d) Instituto Nacional de Meteorologia e Geofísica: recolhe informação meteorológica e possui uma rede de radiação solar que abrange todo o país.

e) Direcção-Geral dos Combustíveis, possui um grupo de trabalho (G. T. E. S.) que vem realizando um louvável esforço para concretizar colaborações de organismos vários no uso da energia solar. Tem ensaios realizados sobre colectores planos nacionais e estrangeiros, em condições reais de funcionamento.

f) Direcção-Geral das Construções Escolares: tem algumas instalações em funcionamento e experiência de utilização em escolas.

g) Escola Superior de Belas Artes do Porto: iniciou com êxito a concepção e integração de realizações tecnologicamente simples na viabilização de novas formas de «habitat».

h) Faculdade de Economia da Universidade do Porto: criou grupos de trabalho que se debruçam sobre o impacto na região dos diferentes modos de conceber o desenvolvimento tendo em conta as potencialidades nacionais. As alternativas energéticas são um dos temas.

i) Instituto Universitário de Évora: possui um Departamento de planeamento biofísico e iniciou estudos base relativos às potencialidades locais de utilização de energia solar.

A listagem e a caracterização não são de modo algum exaustivas e são apenas as que naturalmente me ocorrem devido a conhecimento pessoal da sua existência.

Apesar do seu carácter incompleto, dão já uma ideia das entidades oficiais que manifestaram interesse concreto avançando para estudos ou realizações preliminares. Apesar disso, o mercado nacional das instalações para aquecimento solar é ocupado na sua quase totalidade por equipamento importado... e na maioria dos casos mal adaptado e ainda pior assistido. Os importadores sabem vender, mas a sua capacidade de resposta a questões técnicas precisas quanto ao equipamento é praticamente nula. O crescimento do mercado tende a modificar a situação. Tal como o aumento de taxas na importaçãão e alguma concorrência que já começa a surgir tenha levado a alguma subcontratação de componentes à indústria nacional... e a descida de preços.

Analisando um pouco mais o porquê de tal situação num país reconhecidamente em crise ocorre perguntar: é tecnologia de ponta ou avançada técnica de venda? A resposta mais adequada será talvez a de que nem uma coisa nem outra. É apenas mais uma manifestação entre muitas outras do trágico desajustamento entre a capacidade inovadora de muitos portugueses e a descrença nela posta pelos que dispõem dos meios de decisão que a torna operativa. No fosso entre ambos está a brecha por onde entra o produto estrangeiro... porque é estrangeiro... porque se falhar o produto mas o produto for estrangeiro, ou de concepção estrangeira a desculpa é fácil... não se podia fazer melhor... era o que de melhor o estrangeiro tinha!

No aproveitamento da energia solar para aquecimento, a incapacidade para digerir as linhas de evolução neste domínio, leva a aguardar que no estrangeiro se imponha... para depois se começar a pensar em utilizá-lo... de origem externa!

Entretanto, uns quantos pioneiros insistiram. Uns quantos nacionais compraram por conta própria. Os jornais vão dando a notícia... e alguns (poucos) responsáveis descobrem, subitamente e estupefactos que numa habitação vizinha, que no Algarve, na Praia das Maçãs, na Espanha onde estiveram, ou no país donde chegam, que aquilo no alto do telhado, era um colector solar e aquela esquisita arquitectura onde havia placas negras... se inspirava afinal num reencontro com o Sol!

Que o traço forte não choque e a ironia não fira. Pretendo apenas que a doutorisse acabe e se evolua para a competência... que é sobrevivência e progresso. Erros assumidos, são erros ultrapassados.

7. CAPACIDADES IMEDIATAS DE ACTUAÇÃO

Colectores solares e termoacumuladores normalizados encontram-se já no mercado português. O vendedor estrangeiro está nalguns casos a importar apenas a superfície colectora... que naturalmente sobrevaloriza. Esta normalização facilita a venda, e facilita a correcção adaptativa no utilizador. Se uma unidade for insuficiente, junta-se outra... e outra.

Encaremos esta via. É a via da produção em série. Qualquer metalomecânica com capacidade de corte e dobragem de chapa, dispõe de equipamento para a caixa. Para a superfície colectora é possível, na maioria dos casos, estudar a forma mais adequada ao equipamento de que se dispõe. O rendimento dessa superfície, seja pintura, seja tratamento químico, seja deposição sob vácuo, possui suficiente latitude para que se encontre a solução mais adequada aos meios fabris sem que seja necessário mais investimento significativo em equipamento. A eficiência térmica final variará, naturalmente, com a solução escolhida. Mas a viabilidade económica não se exprime pela eficiência térmica final mas sim pelo custo final da energia aproveitada, tendo em conta a durabilidade do equipamento.

Referimos a solução metálica para a caixa. Mas nem a caixa nem o colector têm necessariamente que ser metálicos. Outros materiais poderão alcançar o mesmo efeito. Trata-se de encontrar a melhor solução entre o disponível no mercado.

O colector normal exige vidro em chapa, ou cobertura transparente com características ópticas nem sequer muito exigentes. Temos produção nacional de chapa de vidro e a generalização do aquecimento solar, que pode representar dezenas de milhar de metros quadrados por ano é um mercado importante para aquele sector industrial.

A instalação exige isolamento térmico. Temos isolantes nacionais e isolantes importados. Estes serão eventualmente, e para já, a solução mais expedita. Mas a incorporação em larga escala ou na totalidade de isolantes nacionais obtém-se em curto prazo com uma adequação do projecto. Os restantes acessórios existem no mercado e são nacionais: são canalizações, etc. A gama de soluções possíveis é tal, mesmo ao nível duma produção em série, ou semi-série, que é virtualmente impossível listá-las.

Para cada caso, optimizar a solução pelos processos tradicionais pode ser enfadonho e moroso. Foi por isso que no C. T. A. M. F. U. L. se automatizou já o processo para os colectores. O computador existe para isso: para optimizar a solução e... poupar tempo e trabalho.

Consideremos seguidamente o caso da adaptação do aquecimento a grandes imóveis ou equipamentos colectivos. Pode, e muitas vezes se justificará pela sua importância e custo, num estudo particular; tal não impede que muitos aspectos parcelares sejam normalizados. Trata-se, sobretudo, de estabelecer uma metodologia de projecto, de juntar um conjunto de informações acerca das características dos materiais disponíveis, capacidades de produção e prazos de entrega. Temos empresas e equipas capazes de fazer o projecto de águas quentes, etc. Basta que incorporem nos seus conhecimentos alguns aspectos fundamentais, que criem experiência começando, que agreguem arquitectos, que criem uma filosofia de conjunto, interdisciplinar... e que multipliquem o esforço investido automatizando muito cálculo enfadonho que os desanima.

Para todos, na indústria que fabrica, na empresa que projecta, existem para lhes dar apoio nos casos singulares, para os manter a par das inovações, para lhes resolver as situações que exigem mestria na ciência fundamental, as instituições universitárias. Estas, por seu turno, desejam que lhes transmitam a experiência que só a realização concreta das obras faculta e que lhes levem os problemas que o trabalho do dia a dia não permite aprofundar. Numa palavra, precisamos de um esforço conjunto! Precisamos que não haja feudos, falsos prestígios, pseudocompetências.

Capacidades imediatas existem e em larga escala.

Tratando-se da introdução a um debate, creio que a sucinta exposição anterior contempla os aspectos que comecei a afirmar não deverem ser esquecidas na actual situação do país. No entanto, desejaria sintetizar as respostas:

Um programa de âmbito nacional de aproveitamento da energia solar pode contribuir significativamente para:

— a redução da dependência energética,
— o equilíbrio da balança de pagamentos no triplo aspecto da redução no consumo de combustíveis, do equipamento importado e da exportação de equipamento de fabrico nacional,
— a criação de um número elevado de empregos na indústria e nos serviços,
— a melhor utilização de equipamento improdutivo ou sub-aproveitado,
— a melhoria da habitação social,
— levar os benefícios da utilização de energia a imensas áreas do interior e estimular aí uma actividade produtiva na mecânica ligeira,
— aumentar a produtividade agrícola.

8. PROGRAMA DE ACTUAÇÃO

Recapitulemos primeiro alguns dados actuais sobre a situação portuguesa:

a) Baixíssimo grau de utilização de energia solar apesar do enorme potencial de que dispomos.
b) Conhecimento científico e técnico nas áreas críticas de utilização generalizada da energia solar.
c) Equipamento fabril subaproveitado ou não utilizado capaz de cobrir todos os sectores da fabricação de equipamento.
d) Enorme mercado potencial nos equipamentos colectivos, na habitação particular, na indústria e na agricultura (superior a 2 ~ 3 milhões de contos ano).
e) Crescente penetração de equipamento estrangeiro mal adaptado ao país.
f) Péssimo aproveitamento das características térmicas naturais dos edifícios e inadequação destes ao clima. Pouca ou nenhuma atenção ao isolamento e à qualidade dos materiais utilizados.
g) Ausência duma visão integrada dos problemas da energia em Portugal.
h) Enorme dispersão de esforços, de sobreposição de trabalhos e de equipamento. Proliferação de falsos prestígios e actuações de fachada. Lacunas de que ninguém cura mas são fulcrais.
i) Enorme desinteresse oficial pelo assunto ao nível dos escalões decisivos de actuação que se reflecte no fraco apoio aos grupos que já revelaram capacidade científica e técnica para encontrar soluções e as passarem à prática.

Como um programa de acção no domínio da energia solar deve ser necessariamente encarado no âmbito de um programa geral de energia; como certas formas de energia têm em Portugal uma situação previlegiada com organismos, feudos e serviços autónomos que deliberadamente, ou por simples deformação tendem a perpetuar e aprofundar o desequilíbrio, a primeira medida concreta e a muito curto prazo é:

— Criação de um Instituto Nacional de Energia que agrupe cientistas, técnicos, equipamentos e instalações dispersas nos Ministérios da Indústria e Tecnologia (L. F. E. Nucleares, D. G. C., I. N. I. I., etc.), da Agricultura e Pescas, do Comércio, da Educação, etc.

Teriam participação nos orgãos de decisão as organizações profissionais e as empresas, etc.

A função deste Instituto seria a de investigação aplicada, formação profissional a todos os níveis, divulgação, dinamização e implementação de soluções práticas. Não teria capacidade de imposição sobre as actividades económicas nem poderes coercivos. A sua finalidade seria de promoção tecnológica e de integração de esforços; não de fiscalização burocrática. Teria algumas atribuições análogas às do L. N. E. C. mas iria muito mais além nas obrigações para com a comunidade. A base fundamental do seu financiamento seria uma percentagem sobre os benefícios económicos directos que promovesse.

No momento actual, a criação de tal Instituto não aumentaria os encargos financeiros do Estado. Pelo contrário, a melhor gestão e dinamização dos recursos humanos e materiais disponíveis, permitiria economias e uma eficácia de actuação que a pulverização e o oportunismo não possibilitam, pelo desânimo que provocam nos mais capazes.

Se a razão fundamental do actual estado de coisas é a ausência de uma clara política energética e a incapacidade para uma efectiva e incisiva actuação que extirpe o feudalismo e a pulverização de esforços; se um Instituto Nacional de Energia pode contribuir significativamente para ultrapassar tal situação, a sua existência não é indispensável para que se inicie desde já uma actuação concreta a qual só teria êxito congregando todos os esforços. Realisticamente, é preferível ter em conta que a simples possibilidade de criar um Instituto Nacional é, infelizmente, susceptível de desencadear movimentos e choques de influências mais interessados em pelouros e poder do que em promover a recuperação económica e a capacidade tecnológica nacional.

Feito este parêntesis, consideremos um plano possível:

A — ACTUAÇÃO IMEDIATA (~ 6 meses)

1 — Criar uma comissão coordenadora com representantes das empresas de engenharia, do sindicato dos engenheiros técnicos e dos engenheiros, dos arquitectos, da indústria ligeira, e dos centros oficiais que se têm dedicado ao assunto.

Criar uma infraestrutura de apoio numa empresa de engenharia (de preferência nacionalizada) que assegure a eficácia das acções.

Pela sua posição de charneira, o interesse das empresas de engenharia é fulcral.

2 — Centrar esforços nos colectores planos.

3 — Lançar cursos de formação e reciclagem, utilizando todos os meios disponíveis nas Escolas Superiores e Técnicas para divulgar o conhecimento existente sobre o assunto susceptível de aplicação imediata não apenas no domínio da energia solar mas da energia em geral.

4 — Sensibilizar os grandes utilizadores (Habitação, Saúde, Ensino...) para a importância do balanço térmico das suas instalações actuais e futuras e para as potencialidades da energia solar. Conseguir a garantia da sua progressiva utilização como factor essencial de criação de um mercado interno impulsionador de toda uma nova actividade económica.

5 — Iniciar a realização duma instalação protótipo de pequena escala, susceptível de grande produção standardizada.

Iniciar o estudo e projecto duma instalação tipo, para demonstração, vulgarização e estudo de novas soluções. O local mais adequado é uma Escola de Engenharia.

Iniciar o estudo de um projecto integrado numa instalação de grandes dimensões.

Solicitar o financiamento através dos fundos para poupança de energia, de apoio às P. M. E., etc.

6 — Sistematizar e divulgar toda a informação já existente sobre os aspectos climatológicos do país relevantes para a utilização racional da energia solar.

7 — Inventariar as capacidades produtivas da indústria. Estabelecera padrões de qualidade. Solicitar aos fabricantes características térmicas e mecânicas dos seus produtos. Conseguir da indústria da chapa de vidro a determinação e manutenção das características ópticas.

8 — Examinar, discutir e apreciar as realizações já existentes no país. Aferir objectivamente a sua adequação e integrar tal conhecimento em projectos a lançar.

B — CURTO PRAZO (~ até 2 anos)

1 — Estabelecer claramente as potencialidades de cada fabricante e os padrões de qualidade que é capaz e deseja manter.

2 — Prospectar o mercado externo. Determinar as características mais desejáveis do equipamento.

3 — Optimizar projectos que incorporem produtos nacionais.

4 — Estabelecer normas de qualidade e segurança.

5 — Estabelecer uma metodologia tipo de projecto para pequenas e grandes instalações.

Automatizar tudo quanto é repetitivo. Usar as enormíssimas capacidades disponíveis no parque nacional de computadores. Estimular a permanente actualização das metodologias e métodos recorrendo aos organismos de investigação especializados.

6 — Criar um banco de dados sobre materiais, características e preços. Usá-lo como instrumento de análise de importações.

7 — Ensaiar, testar e desenvolver sistematicamente novos protótipos. Concretizar industrialmente as soluções mais promissoras encontradas nos laboratórios de investigação.

8 — Desenvolver as aplicações na refrigeração e articular a acção com o Instituto Nacional do Frio.

9 — Disseminar as soluções de realização simples a nível rural, usando materiais locais.

10 — Lançar a secagem, a nível de exploração agrícola. Estabelecer a viabilidade económica da dessalinização, da utilização de estufas, etc.

11 — Lutar decididamente contra a separação das Escolas das realidades concretas da economia do país. Apoiar decididamente quem se mostra capaz. Fornecer-lhes meios adequados, realisticamente. Lutar contra a proliferação de actividades descoordenadas, mas lutar também contra o centralismo asfixiante e burocrático que estiola a criatividade e a inovação responsável. Tal centralismo existiu e reforça-se pela via da concessão dos apoios financeiros e outros.

C — MÉDIO E LONGO PRAZO

Poder-se-ia planificar uma actuação e estabelecer metas. Todavia, se o imediato e o curto prazo não forem vigorosamente encarados, de pouco vale falar do médio e longo prazo. Se o imediato e o curto prazo não forem vigorosamente encarados, no médio e longo prazo estaremos inteiramente colonizados e transformados em fornecedores de mão-de-obra barata... e de capatazes diplomados. Os títeres não planeiam, embora possam votar.

Em vez de falar no médio e longo prazo, é fulcral assegurar que a actuação presente não vai liquidar o futuro. Não fazer nada é também um modo de actuação.

A exposição anterior insere-se na linha de um futuro diferente, de um futuro de dignidade humana recuperada e vivida. O futuro começa hoje. É pois imprescindível que ataquemos as tarefas que ao Hoje cabem, em vez de nos dispersarmos na ilusão de um futuro que transfere para o milagre a solução de erros que não queremos enfrentar e corrigir, Hoje!

NÚMERO 437 DEZEMBRO DE 1976 ANO LI VOLUME XXXVIII

C. D. U. 62.001

Planeamento da investigacão no sector da Engenharia Mecânica em Portugal

J. J. DELGADO DOMINGOS
Prof. Catedrático I. S. T.
C.T.A.M.F.U.L.

RESUMO

Como os recursos para a investigação sempre escassos analisa-se a estratégia da sua repartição pelos sectores fundamentais a partir do seu efeito multiplicativo ou factor de impacto. Tal impacto tem em conta a estrutura actual da indústria mecânica do país e os factores essenciais que têm motivado o seu desenvolvimento. Finalmente mostra-se como a investigação em Termodinâmica Aplicada representa um sector chave para um desenvolvimento moderno a caminho da progressiva automatização.

SUMMARY

Because research funds are always scarce, its allocation must be based on impact analysis. This analysis takes into account the present structure and development of the mechanical industries in Portugal and the main factor behind its development. It is show how research in Applied Thermodynamics is a key sector for modern development in a way to progressiva autonomy.

1 — INTRODUÇÃO

1.1. A primeira dificuldade em discutir o planeamento da investigação no sector da Engenharia Mecânica está em definir o que se entende por este sector. A Engenharia Mecânica é um sector essencialmente interdisciplinar, cobrindo um vastíssimo leque de aplicações. Entre nós, alguns dos seus domínios mais relevantes não entraram ainda, no senso comum como sendo do seu âmbito. Tal atitude decorre, essencialmente, do facto de à indústria mecânica se associar a manufactura, a produção, e se desconhecer a investigação básica que lhe é aplicável e se traduz em projectos e realizações sem excessivo desenvolvimento intermédio.

Na Engenharia Mecânica deve encontrar-se uma síntese dos seguintes sectores fundamentais:

a) Termodinâmica Aplicada (Energia — sua transferência e conversão, sobretudo nos aspectos de calor e massa e mecânica dos fluidos).
b) Identificação e cálculo das solicitações (forças) e das condições (temperatura, corrosão, etc.) em que o equipamento irá funcionar.
c) Conhecimento e especificação dos materiais mais adequados à concretização do projecto.
d) Tecnologia de fabricação propriamente dita.

1.2. Só a última é tradicionalmente considerada como especificamente mecânica, e dessa atitude se encontra reflexo nos programas dos próprios cursos de Engenharia Mecânica até há relativamente poucos anos. Nessa atitude se filia também o carácter artesanal de um grande sector, e a dependência tecnológica em relação ao exterior do que nele constitui a fracção mais avançada.

Ora, a indústria mecânica constitui uma infraestrutura básica de qualquer país industrializado, e é factor essencial no seu desenvolvimento. No nosso país, em termos de postos de trabalho e de contribuição para o P. N. B. a importância da indústria mecânica é muito apreciável e vai certamente crescer. Todavia, devemos acentuá-lo, o seu valor acrescentado está muito aquém do que poderia e deveria ser, porque a fracção que incorpora de matéria cinzenta é muito diminuta. Deste facto resulta que a sua capacidade de criação de emprego está muito longe do que poderia alcançar, e a valorização dada ao trabalho incorporado muito pequena. Do facto resultará que, embora globalmente o volume de emprego e de contribuição para o P. N. B. venha naturalmente a aumentar, esse aumento se verifique, sobretudo, por efeito de condições favoráveis de mão-de-obra pouco qualificada e em consequência da

exploração dessa reserva por empresas estrangeiras ou suas subalternas nacionais ou nacionalizada. E se as condições do presente obrigam a que assim seja, a emancipação só poderá surgir se decididamente se valorizarem os factores *a*) *b*) *c*) *d*), pela ordem indicada, e simultaneamente se estimular e valorizar a sua intepenetração.

As razões porque se advoga esta estratégia decorrem de uma análise do efeito multiplicativo do impacto de cada um deles.

1.3. Deverá ainda acentuar-se que *o financiamento da investigação em Engenharia Mecânica é singularmente diminuto relativamente a outros ramos da Engenharia não apenas em valor absoluto como também, (e em situação muito mais agravada) quanto à percentagem do P. N. B. para que contribui.* Fruto dos condicionalismos habituais, não pode deixar de se chamar veementemente a atenção para o facto de existirem três centros universitários neste domínio (dois em Lisboa e um no Porto) dois dos quais criados em pouco mais de um ano a quando da reestruturação dos Centros do hoje Instituto Nacional de Investigação Científica (I. N. I. C.).

O Centro de Termodinâmica Aplicada e Mecânica dos Fluidos, antigo Núcleo de Estudos de Engenharia Mecânica, cuja actividade se tem situado no domínio da investigação fundamental aplicável, e tem promovido a sua aplicação, apesar de mais de dez anos de existência, continua a não dispor de meios ou instalações que sejam sequer comparáveis aos que já hoje existem sobretudo no âmbito da Física e Química, como sejam o Complexo Interdisciplinar e o Instituto de Física e Matemática, ambos do I. N. I. C.

Sem que se ponha em causa a necessidade de dotar aqueles domínios de meios adequados, nem por isso pode deixar de assinalar-se a necessidade de urgentemente serem corrigidas tais distorções de modo a estabelecer-se uma repartição de fundos mais consentânea com o impacto no desenvolvimento económico do país, e no seu potencial científico e tecnológico.

2 — ANÁLISE DOS FACTORES DE IMPACTO

2.1. A actual estrutura da indústria mecânica nacional é típica de um sector de fraco índice tecnológico cujo desenvolvimento se processou ao sabor de tradicionais factores de mercado, traduzido em milhares de pequenas unidades de implantação local que laboram como subsidiárias na manutenção de equipamento importado, ou no manufactura de produtos tradicionais (cutelaria, material agrícola, etc.), a par de um número muito restrito de grandes unidades inteiramente dependentes de tecnologia importada e de que são quase totalmente subsidiárias mesmo quanto à colocação de produtos.

A expansão do sector irá naturalmente verificar-se com as características que possui, sendo esperável uma melhoria das tecnologia de fabrico pelo simples efeito dos factores em jogo. Tal significa que não se prevê um grande impacto, ao nível das tecnologias de fabrico, de um significativo incremento da investigação aplicada nesse domínio, salvo em domínios muito restritos. Impacto importante, ao nível sobretudo da pequena e média empresa poderá sim verificar-se actuando ao nível da formação profissional, dos cursos intensivos e da reciclagem. Neste sector, é pois a actividade que possa estimular esta intervenção a que deve ser prioritariamente contemplada. Tal não significa que a investigação aplicada nesta zona seja descurada, mas sim que ela deve estimular basicamente uma actividade de formação. Nesta óptica o patrocínio de investigação nos domínios da soldadura e da fundição (ferro e metais não ferrosos, areias de fundição, técnicas de moldagem, etc.), apresenta-se como a mais adequada.

No escalão seguinte de impacto crescente situa-se o sector das máquinas-ferramentas, do seu controlo automático a vários níveis (peunático, hidráulico, digital, etc) e dos processos de enformação e corte de chapa. Deve, paralelamente, apoiar-se o desenvolvimento da metrologia, não só pelo efeito geral na melhoria da qualidade (e uniformidade) da produção, como sobretudo pelo estímulo à mecânica de precisão, que constitui um sector já importante e cujas potencialidades estão longe de se encontrar devidamente exploradas.

A filosofia que preside às recomendações anteriores centra-se no facto de que a tecnologia do fabrico evolui com a solicitação e esta origina-se sobretudo no projecto e desenvolvimento de novos produtos e novos equipamentos.

Nas linhas actualmente existentes no I. N. I. C. é sobretudo o Centro da Universidade do Porto o que melhor se situa neste domínio.

No concernente à soldadura refira-se o CEMUL, e as ligações existentes entre ele, o Instituto de Soldadura e o CIMAF.

2.2. Num escalão qualitativo superior, situa-se o conhecimento e adequada especificação de materiais. Estreitamente ligado ao anterior, o carácter multiplicativo do investimento é maior desde que a disseminação dos resultados adquiridos seja assegurada. Este domínio tem estreita ligação com a metalurgia (tal como muitas técnicas de fabrico) e também com o vasto sector dos materiais não metálicos; um e outro têm sido tradicionalmente tratados no âmbito da engenharia química, devendo por esse facto notar-se que a óptica de maior interesse para a Engenharia Mecânica é frequentemente descurada constituindo um bloqueio, raras vezes identificado na transferência para as aplicações de resultados obtidos pela Química ou Metalurgia. A óptica fundamental para a Engenharia Mecânica é a das características mecânicas dos materiais, a sua adequação a finalidades específicas, a sua facilidade em ser trabalhada, a estabilidade dimensional, a durabilidade e envelhecimento, a da sua adaptação

através de tratamentos apropriados (tratamentos térmicos, por exemplo), etc.

O CEMUL inclui, nas suas linhas de investigação, parte destes objectivos.

2.3. A identificação e cálculo de solicitações situa-se na zona do impacto crescente. Não nos alongaremos sobre ele, por nos parecer demasiado óbvio. Acentuamos apenas que é imprescindível um decisivo apoio ao cálculo numérico, única via de exploração no grau mais elevado de novos conceitos de dimensionamento que optimizem simultaneamente a economia do material e a exploração máxima das suas características. Tal só será conseguido com o fácil acesso a meios poderosos de cálculo automático. A sua generalização, devidamente estruturada, é susceptível de efeito imediato, se forem simultaneamente estimuladas duas frentes: o desenvolvimento de novos métodos de cálculo, seguros e eficazes; a normalização e extensa difusão de «programas de projecto», de tal modo concebidos que um utilizador corrente na indústria não seja obrigado a dominar os pormenores, permitindo a generalização de algo semelhante ao uso de um automóvel ou um telefone, em que é desnecessário conhecer a fundo como funcionam para eficazmente se poderem utilizar.

No desenvolvimento de novos métodos poderão convergir várias linhas de investigação já existentes, devendo assinalar-se a importância do encontro útil de matemáticas e engenharias. Tanto neste desenvolvimento, como na sua disseminação, o reforço dos meios do Centro de Cálculo das Universidades de Lisboa, dadas as suas características de serviço, é fundamental, sobretudo no que se refere ao teleprocessamento e ao tratamento óptico e gráfico da informação.

O desevolvimento de tais métodos de cálculo centrou-se até agora, sobretudo, no Centro de Termodinâmica Aplicada, no C. C. U. L. e numa das linhas de investigação do CEMUL.

3 — TERMODINÂMICA APLICADA

3.1. A energia representa um sector vital em qualquer economia. Entre nós, tem existido a atitude simplista de a reduzir à hidroelectricidade e ao transporte e conversão de energia eléctrica. Com o aumento da componente térmica na produção de energia eléctrica, começou finalmente a emergir a ideia de que ele poderia ser bem mais vasto. Ora, se na hidroelectricidade e no transporte as perdas já são importantes, tal efeito é fortemente acentuado no caso das térmicas, sejam elas convencionais ou nucleares. Por outro lado, tanto na produção como na transformação da energia eléctrica, os aspectos referentes à transferência de calor são dominantes. Por sua vez, a transferência de calor e de matéria e a mecânica dos fluidos estão intimamente associadas, e a unidade de todo o processo sobressai logo que é encarado um pouco acima do empirismo tradicional. A sua vital importância e impacto tornam-se evidentes logo que o problema é colocado na perspectiva fundamental da termodinâmica. Como esta perspectiva vem sendo sistematicamente adoptada pelo signatário, houve sempre o receio de a sobrevalorizar, acompanhada do sentimento de para a sua importância se não ter devidamente chamado a atenção, sobretudo num meio pouco receptivo e preparado para a compreender. Tal envolvimento pessoal deverá naturalmente ser tido em conta no que se segue, embora se procure nele o máximo de objectividade.

3.2. Se examinarmos as indústrias mecânica e química de qualquer país desenvolvido, imediatamenet descortinamos que a transferência de calor e massa e a mecânica dos fluidos se encontra na raiz mesmo da maioria dos processos industriais na indústria química e na da energia, e que o seu efectivo domínio é um factor essencial para o efectivo domínio do projecto e da tecnologia de vastíssimos sectores industriais. Na realização do seu equipamento ,a indústria mecânica tem papel fundamental. Na coordenação e concatenação deste equipamento diverso, desempenham importante papel as «Empresas de Engenharia».

Pela complexidade intrínseca dos fenómenos físicos em causa, a parte empírica teve até há pouco papel dominante, e daí a sua compartimentação. O advento dos computadores e dos métodos de cálculo a que deu viabilidade permitiu um substancial salto qualitativo no domínio unificado do seu tratamento e eumentou substancialmente a sua capacidade de impacto nos sectores mais variados. Esta foi a via seguida pelo CTAMFUL e a razão por que veio a desenvolver métodos numéricos e analíticos autónomos para a solução de sistemas de equações em derivadas parciais não lineares, e investigação fundamental de natureza experimental que lhe permitiram ou permitirão intervir em aspectos tão variados como o projecto de fornos; câmaras de combustão da indústria vidreira, cerâmica, dos cimentos, das centrais térmicas; da conservação de alimentos (indústria frigorífica), da hidrodinâmica naval, do aproveitamento da energia solar, geotérmica, das ondas; no desenvolvimento dos métodos de previsão e dispersão de poluentes, etc.

Por outro lado, este sector foi reconhecido pela UNESCO como dos de maior impacto no «take off» de países em vias de desenvolvimento na criação de uma tecnologia autónoma e capaz de extrair um máximo dos recursos naturais existentes nesses países.

As razões anteriores ,a experiência já existente e a necessidade de identificar as zonas de impacto máximo num esforço concertado de investigação e desenvolvimento, sobretudo numa altura em que tantos mal entendidos parece existirem no modo como uma investigação fundamental de base pode contribuir, a curto prazo, para uma crescente emancipação tecnológica nacional, levam-nos a considerar

este sector como dos mais incisivamente capazes de ultrapassar múltiplas contradições.

Porque não só o domínio da transferência de calor e massa e a mecânica dos fluidos são decisivos na realização de um laser químico, como no confinamento e estabilidade de um plasma na fusão nuclear, como no projecto de um prosaico fogão de cozinha que aproveite ao máximo as calorias de um combustível cada vez mais raro e caro. Para o conseguir, precisa incorporar os últimos avanços conseguidos pelos matemáticos na demonstração de teoremas de existência e unicidade, de equações em derivadas parciais em campos contínuos ou aleatórios, como precisa da química física os valores de viscosidades ou condutibilidades térmicas de misturas binárias ou ternárias, de coeficientes de termo-difusão, de velocidades de reacção; da física de películas finas as propriedades radiantes de superfícies; dos especialistas em electrónica a realização de contadores de hiper-frequências para a sua anemometria laser, etc.

Consideramos pois que a este conjunto, genericamente designado por Termodinâmica Aplicada, deve não apenas ser reconhecido o estatuto de Investigação Fundamental como o da Aplicada (que sabe como e onde aplicar) como lhe devem ser concedidos os meios correspondentes a sector prioritário.

Actualmente, neste sector, existe apenas um Centro em Lisboa, e uma linha de investigação no Centro de Engenharia Mecânica da Universidade do Porto.

Para além de ser reconhecida prioridade à investigação fundamental na transferência de calor e massa e à mecânica dos fluidos, são de elevada importância as suas aplicações:

- conservação de alimentos (indústria frigorífica, de leofilização)
- combustão industrial (caldeiras, fornos, etc.)
- hidrodinâmica naval
- aproveitamento de energia solar
- aproveitamento de energia do vento
- aproveitamento de energia das ondas
- aproveitamento do calor perdido, no âmbito de um melhor aproveitamento da energia
- motores de explosão e combustão interna
- utilização e valorização de isolantes
- exploração agro-pecuária
- poluição
- conforto da habitação.

Em todos os sectores mencionados, existem já contactos ou projectos em curso com organismos públicos e privados, estando assegurada a utilização dos resultados que se obtiverem. Não existe, portanto, o problema da falta de interesse nem de aplicação de resultados. Existe sim o dos meios humanos e materiais nos Centros que o podem fazer. Cabe às entidades de quem depende a sua concretização, darem conteúdo à afirmação tantas vezes expendida de que a Universidade deve estar ao serviço do País. Quando, na Universidade houve centros que largamente ultrapassaram as realizações que seria legítimo esperar dos meios que lhe facultaram, é tempo de exigir que haja quem cumpra o que minimamente lhe compete.

C. D. U. 620.93:536.662

Fenómenos de combustão com importância em Engenharia

MÁRIO NERY R. NINA (*)

RESUMO

Portugal depende dos combustíveis fósseis para satisfazer mais de 80% das suas necessidades energéticas presentes.

Um conhecimento mais aprofundado da Mecânica dos Fluidos e da Química dos Sistemas com Combustão será indispensável se se pretender melhorar o aproveitamento dos combustíveis e minorar os efeitos prejudiciais das emissões que lhe estão associados.

A linha de Combustão do C.T.A.M.F.U.L. propõe-se contribuir para este esforço, desenvolvendo métodos de cálculo de câmaras de combustão e validando-os através de experimentação laboratorial e de medidas em instalações industriais, divulgando os resultados obtidos e realizando cursos intensivos na sequência do que efectuou em Dezembro de 1975.

ABSTRACT

Over 80% of the energy used in Portugal today is derived from fossil fuels.

A better understanding of the Fluid Mechanics and the Chemistry of Reacting Systems will be required in order to improve the efficiency of combustion processes and simultaneously decrease the amount of harmful effluents.

The Combustion Group of C.T.A.M.F.U.L. is concentrating efforts in the development of better furnace prediction methods, validated through experimental data obtained both in the laboratory and in industrial instalations, and offering short specialised courses like the one that took place in December 1975.

INTRODUÇÃO

Desejaria ajudar a situar o tema com a constatação de dois factos:

1 — nos últimos 200 mil anos o Homem tem utilizado a combustão para os mais diversos fins e não teve à sua disposição nem modelos físicos complexos nem computadores, excepto nos últimos 20 anos.

2 — as previsões optimistas indicam que 90% do combustível fóssil existente na Terra se esgotará dentro de 100 anos, (óleo e gás natural) e em 300 anos o carvão.(1)

donde se pode inferir que os esforços adicionais no sentido de melhorar a compreensão actual dos fenómenos de combustão serão irrelevantes.

Em contrapartida faço notar os três seguintes aspectos:

1 — o valor do combustível gasto anualmente no *mundo* é de cerca de 10^{13} Escudos (p.e. Portugal consumiu em 1974 mais de 10^{10} Escudos) ou seja, a humanidade dispende em energia uma parte substancial das suas possibilidades.

2 — A agressão ao ambiente provocada pela utilização de tão elevada quantidade de combustível fóssil tem consequências diversas e pesadas.

3 — tanto quanto se pode prever, as fontes alternativas de energia (solar, geotérmica, das marés, etc.) apresentam problemas de armazenazem e/ou transporte. Por exemplo, no caso específico dos transportes aéreos e rodoviários não está à vista a viabilidade de substituição da energia química dos combustíveis líquidos fósseis ou não por outra forma alternativa.

A procura de soluções para os problemas que decorrem directamente dos aspectos atrás enunciados deverá orientar-se, essencialmente, em duas vias fundamentais e distintas:

— definição de uma política energética global (nacional) no sentido de uma racionalização produção-utilização, redução dos desperdícios, das emissões, controlo das agressões ao meio ambiente, com apoio de legislação e meios de intervenção adequados;

(1) Estimativas dependentes da tecnologia e dos respectivos custos.

(*) Assistente do I. S. .T., Bolseiro do C. T. A. M. F. U. L. — Centro de Termodinâmica Aplicada e Mecânica de Fluidos das Universidades de Lisboa.

— progresso científico e tecnológico de modo a melhorar a relação rendimento-custo dos sistemas e controlar a poluição gerada pela combustão e isto tendo em conta que a qualidade dos combustíveis poderá piorar, pelo menos, a médio prazo.

Limitando-me a este segundo aspecto de melhoria tecnológica e retomando o que atrás disse ao tentar dar pontos de apoio para localizar o tema, poderei afirmar que se reveste de particular importância a procura continuada de uma melhor compreensão dos fenómenos de combustão porque:

— um pequeno aumento de rendimento conduz a economia de verbas substanciais;

— a poluição tem necessariamente de ser controlada dado que os custos da agressão que provoca são enormes, a qualidade dos combustíveis continuará a piorar e a quantidade utilizada e o preço deverão aumentar pelo menos no futuro próximo;

— os combustíveis líquidos serão insubstituíveis durante vários séculos em sectores importantes da actividade humana e a tecnologia actual de combustão de hidrogénio (combustível do futuro) está longe de corresponder às exigências desse futuro (p.e. altos níveis de emissão de NO_x, limites de detonação inadequados, baixa eficiência dos sistemas de controlo de diluição nas câmaras de combustão).

EXEMPLOS DE COMBUSTÃO NA INDÚSTRIA

Passarei agora em revista exemplos de fenómenos de combustão tentando localizar as áreas onde a investigação em combustão tem interesse para o Engenheiro, fabricante de equipamento e utilizador.

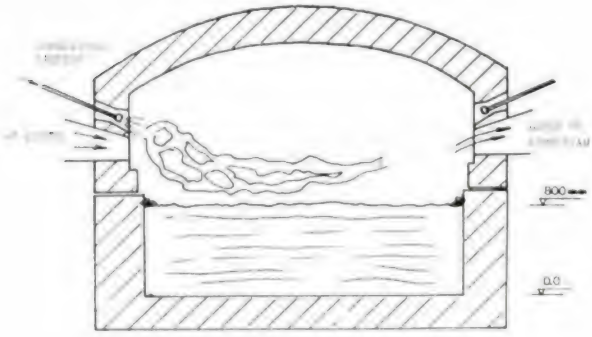


Fig. 1 — Forno-tanque de fusão de vidro (corte)

A — o forno industrial

A figura 1 mostra um corte esquemático de um forno-tanque de fusão de vidro. A diversidade de tipos de fornos utilizados na indústria é grande tornando este equipamento especialmente interessante do ponto de vista de emprego de métodos de cálculo. Os custos de capital são elevados o que obriga a uma grande prudência na inovação ou até na simples extrapolação. Por exemplo, conseguir uma distribuição adequada do fluxo de calor por radiação é importante pois permite baixar os custos de investimento (permitindo o emprego de materiais menos dispendiosos) e aumentar o rendimento térmico e a produção unitária.

A conversão de equipamento existente para outro combustível (passagem de carvão a fuel-oil ou gás natural) pode ser analisada com o auxílio dos métodos de simulação já existentes.

Resumindo, enunciam-se algumas das exigências correntes:

— distribuição de temperatura necessária ao processo, por conveniente repartição entre transmissão por radiação e convecção;

— combustão completa com emissões dentro dos níveis eventualmente impostos por lei;

— estabilidade de chama e ausência de oscilações e ruído;

— tolerância às flutuações das características do combustível disponível no mercado;

— rendimento térmico global adequado ao preço previsível do combustível para a vida da instalação e ao capital a investir.

B — a câmara de combustão dos geradores de vapor (figura 2)

Este órgão fundamental na produção de energia tem sido objecto de cuidadosos e variados estudos e tem de tal modo atraído as atenções dos engenheiros de combustão que dominou a cena durante anos. Os problemas que levanta são muito importantes e complexos mas não devemos esquecer que representa apenas um tipo particular de câmara de combustão que classificarei como combustão de alta intensidade (pois uma das formas de reduzir o custo inicial é diminuir o volume da câmara).

Em oposição a esta situação está o exemplo anterior do forno-tanque de fusão de vidro que tem «chamas longas». No aspecto da estabilidade de chama e da necessidade de equipamento de detecção este problema é peculiar às chamas de alta intensidade em câmara de paredes frias.

Por outro lado, as dimensões das fornalhas dos grandes geradores de vapor para Centrais Térmicas (600 — 1000 Mw) e a tendência para reduzir o número de queimadores cria condições favoráveis à existência de fenómenos de deslocação de chama que provocam assimetrias nos fluxos de calor com graves consequências tanto na operação como na vida do equipamento.

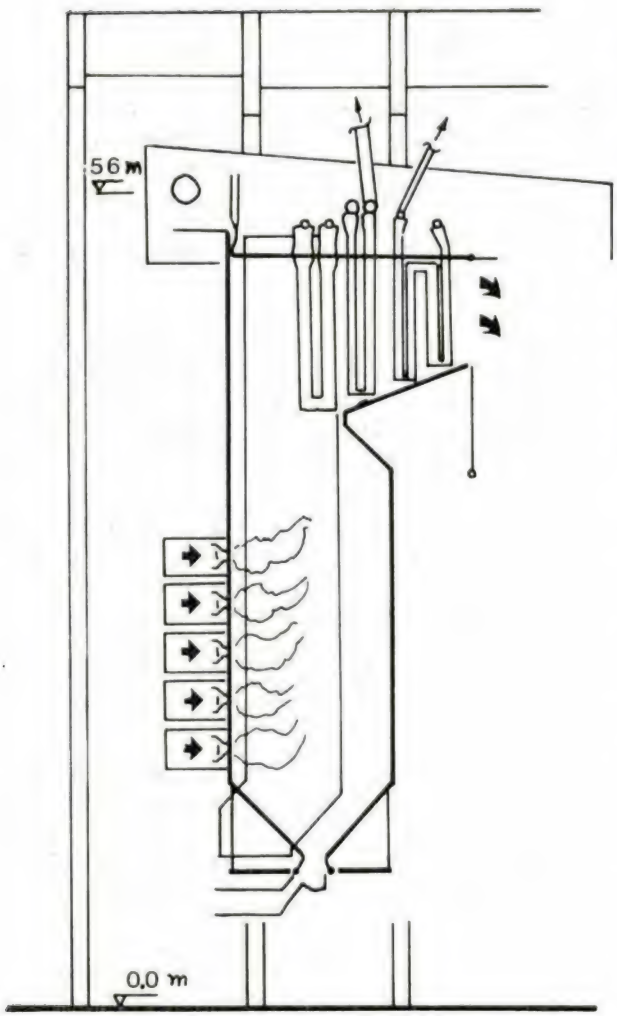


Fig. 2 — Câmara de combustão de gerador de vapor (600 Mw)

Algumas características desejáveis são em resumo:

— combustão completa com níveis de emissão controlados;

— controlo das corrosões que afectam os órgãos submetidos a temperatura elevada;

— ausência de ruído e oscilações;

— bom comportamento com a variação de carga em especial temperatura de vapor constante;

— boa estabilidade de chama (chama de alta intensidade em câmara de paredes frias).

C — o motor de combustão interna

Os problemas que se nos deparam neste tipo de sistema são variados e incluem a procura de maiores potências e rendimentos e, mais recentemente, a limitação das emissões consideradas nocivas.

No caso do motor diesel aproveita-se a ignição espontânea da mistura inicial sendo depois a combustão controlada pelo ritmo da injecção do combustível. A busca de mais potência conduz a usar todo o oxigénio disponível na câmara e como consequência à emissão de fumo; procura-se ainda tornar simultaneamente a combustão tão adiabática e silenciosa quanto possível.

O motor a gasolina tem o seu rendimento essencialmente limitado pelo fenómeno de auto-ignição que é a todos os títulos prejudicial e que é controlado pelos construtores através de geometrias adequadas para a câmara e por meio de aditivos no combustível, mas o problema continua em aberto pois tem interesse conseguir melhores rendimentos usando combustíveis de mais baixo índice de octano.

Como características e problemas típicos do diesel temos:

— vaporização e/ou combustão de gotas;

— velocidade limitada pela dinâmica das sucessivas fases do processo de combustão;

— emissão de fumo e ruído;

— arranque a frio difícil.

No caso do motor a gasolina:

— a cinética das reacções químicas condiciona o avanço da frente de chama no sistema com pré-mistura; seria desejável conseguir câmaras de combustão funcionando com misturas pobres;

— controlar as emissões de hidrocarbonetos, monóxido de carbono e de óxidos de azoto.

D — a câmara de combustão de turbina de gás de aviação (figura 3)

Pretende-se um sistema de queima compacto, oferecendo baixa resistência à passagem dos gases (devido ao efeito sobre o rendimento do ciclo) e fornecendo à turbina uma corrente de gás a temperatura espacialmente uniforme.

Do ponto de vista de emissões, o problema presente não é grave pois existem boas condições de dispersão excepto na fase de manobra nos aeroportos. Assim a optimização do sistema de combustão está condicionada por vários parâmetros irreconciliáveis e aqui também os métodos de cálculo poderão vir a substituir os ensaios em protótipo:

— combustão completa e estável;

— baixa perda de carga;

— temperatura uniforme à saída (tensões térmicas nas pás da turbina).

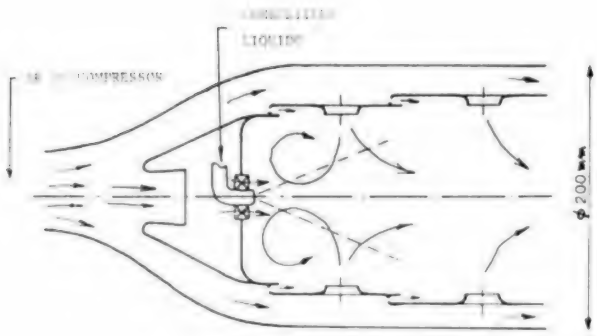


Fig. 3 — Câmara de combustão de turbina de gás (zona de chama)

Estes quatro exemplos servem para ilustrar aplicações industriais onde um melhor conhecimento dos fenómenos de combustão pode traduzir-se em benefícios de natureza diversa, tais como, maior economia, maior potência, menor ruído e poluição, vida mais longa para os componentes do sistema, que são outras tantas preocupações do projectista e do utilizador.

PERSPECTIVAS DA INVESTIGAÇÃO EM COMBUSTÃO

Portugal recorre aos combustíveis fósseis para satisfazer cerca de 80% das suas necessidades energéticas, situação que não virá a ser substancialmente alterada a médio prazo. Por outro lado, o país importa, presentemente, a maioria dos equipamentos onde é levada a efeito a queima do combustível (quer sob a forma de aquisição do projecto quer por directa importação de equipamento) no entanto, a área de intervenção restrita que está à disposição dos técnicos portugueses é importante, quer na definição das características e escolha dos equipamentos quer na sua exploração e melhoria, e não tem sido mesmo assim totalmente utilizada.

O desenvolvimento e permanente actualização de um corpo de conhecimentos capaz de permitir atacar eficazmente os problemas dos sistemas de combustão com que se defrontam os técnicos portugueses terá diversas repercussões e a curto prazo dará contribuição positiva para o problema mais geral da Energia e da sua racional utilização.

Sem pretender apresentar exaustivamente tópicos de combustão onde existem áreas por clarificar, enunciam-se alguns temas que são objecto de atenção em programas de trabalho no C.T.A.M.F.U.L.:

1 — *escoamentos turbulentos com reacção química* — as grandes chamas industriais estão aqui incluídas e existem modelos para descrever a transferência de energia, de massa e os aspectos globais da cinética química que intervêm. O aperfeiçoamento destes modelos depende criticamente de experimentação adequada.

2 — *instrumentação* — o projecto e construção de aparelhagem capaz de permitir clarificar e avaliar características particulares dos escoamentos com reacção é essencial; em particular, o desenvolvimento do anemómetro laser possibilitará a observação dos mecanismos de turbulência relevantes.

3 — *limites de ignição em misturas ricas e pobres e limites de extinção* — as misturas afastadas da composição estaquiométrica são mal conhecidas embora se revistam de grande importância nas aplicações.

4 — *combustão de «sprays»* — na grande maioria dos casos o combustível líquido é previamente pulverizado e os mecanismos que controlam a inter-acção das gotas com a atmosfera oxidante envolvente são mal conhecidos. O nível de emissão de poluentes e a eficiência da câmara de combustão estão ligados aqueles mecanismos.

5 — *formação e destruição de partículas sólidas* — é impossível calcular com rigor a transferência de calor por radiação numa chama luminosa desconhecendo os parâmetros que afectam a formação e o desaparecimento das partículas sólidas. Estas partículas, por outro lado, vão contribuir para as emissões e são responsáveis pelas corrosões que se dão em áreas localizadas dos equipamentos. É pois importante vir a dominar estes processos que ocorrem em muitos sistemas de combustão com particular relevo para os que queimam fuel-oil e carvão.

6 — *métodos de cálculo para câmaras de combustão* — todos os aspectos anteriores contribuem para o sucesso ou insucesso dos métodos de cálculo com os quais se pretende simular as condições existentes numa câmara de combustão com uma geometria e um combustível impostos.

Estes métodos estão operacionais com as limitações que decorrem quer do incompleto conhecimento de certos mecanismos da mecânica dos fluidos e da cinética das reacções químicas quer da capacidade dos meios de cálculo à disposição do Centro.

Dentro dos objectivos do C.T.A.M.F.U.L. e em particular da sua linha de Combustão inclui-se a divulgação do trabalho produzido, através de relatórios de actividades periódicos, da publicação de artigos em revistas da especialidade e ainda do trabalho docente dos seus colaboradores no âmbito das Universidades de Lisboa e mais especificamente em cursos intensivos abertos à participação da indústria, como o que se realizou em Dezembro de 1975.

C. D. U. 621.018

A calorimetric experimental furnace [1]

J. J. D. DOMINGOS.
E. MANSO [2]
M. N. R. NINA

RESUMO

Projectou-se e construiu-se uma fornalha de secção quadrada (500×500 mm) com o objectivo de permitir obter valores experimentais para validação de métodos de cálculo de câmaras de combustão e fazer ensaios de queimadores e de corrosão de alta temperatura.

A estrutura da fornalha permite variações na geometria dos circuitos dos gases e da água de arrefecimento.

Apresentam-se resultados de ensaios de um queimador do tipo cone rotativo, onde se mostra a influência da carga e do excesso de ar na distribuição do fluxo de calor.

ABSTRACT

A 500×500 milimeter square section furnace was designed and built to provide data for the testing of prediction procedures applied to furnace design and to enable experiments to be carried on high temperature corrosion and burner design.

The furnace structure allows the geometry of the gas passage and the cooling circuit to be assembled in several ways.

Some preliminary test results are presented and show the effect of excess of air and load on local heat flux using a rotating cup type of burner.

INTRODUCTION

Although the general laws of Combustion and Heat Transfer are well understood, fuel-fired furnace design remains an art in many respects; the need to reduce costs and to control emission of harmful combustion products are two important reasons to look for better and more accurate design methods.

Within the scope of the joint research program between Division of Applied Thermodynamics of I. S. T. and L. E. M., it was decided to design and built an experimental calorimetric furnace to be used primarily for testing of prediction procedures applied to furnace design and more specifically the prediction of temperature distributions, and to help in problems directly connected with the needs of local industry in furnace design, manufacturing and operation.

EQUIPMENT

The design of the furnace body structure enables the easy modification of its geometry. The basic constitutive element, fig. 1, is a square ring, 500 mm by 500 mm, 100 mm thick.

A number of these elements can be juxtaposed in a way that there is continuity both on the gas and the water passages. Provisions were made to allow the water circuit to be obtained either by connecting the elements in series, in parallel-series or as separate groups of elements.

Each element is self contained in what regards thermal insulation. A thermocouple well in the water circuit and two flame observation windows are provided in each standard element. There are also non-cooled refractory elements for specific uses, p.e. with gas recirculation inlet ports, with instrument doors.

A 90° refractory corner makes it possible to have a water cooled vertical section or a direct connection to the stack.

The furnace is instrumented to allow measurements of metal temperatures, water temperatures, pressures and flow rates, gas temperatures (with an aspirating pyrometer) and combustion gases composition. The furnace cooling water runs in closed circuit passing through two sets of tubular heat exchangers. Two independent water flowmeters are installed, besides a measurement by weigth. The combustion air is supplied to the burner by an electric motor driven centrifugal fan; two separate orifice meters (in accordance with B. S. 1042) allow the measurement of primary and secondary air flows.

(1) Paper for the European Symposium on Combustion, Sheffield, September 1973.
(2) LEM — Direcção-Geral de Combustíveis, Lisbon.

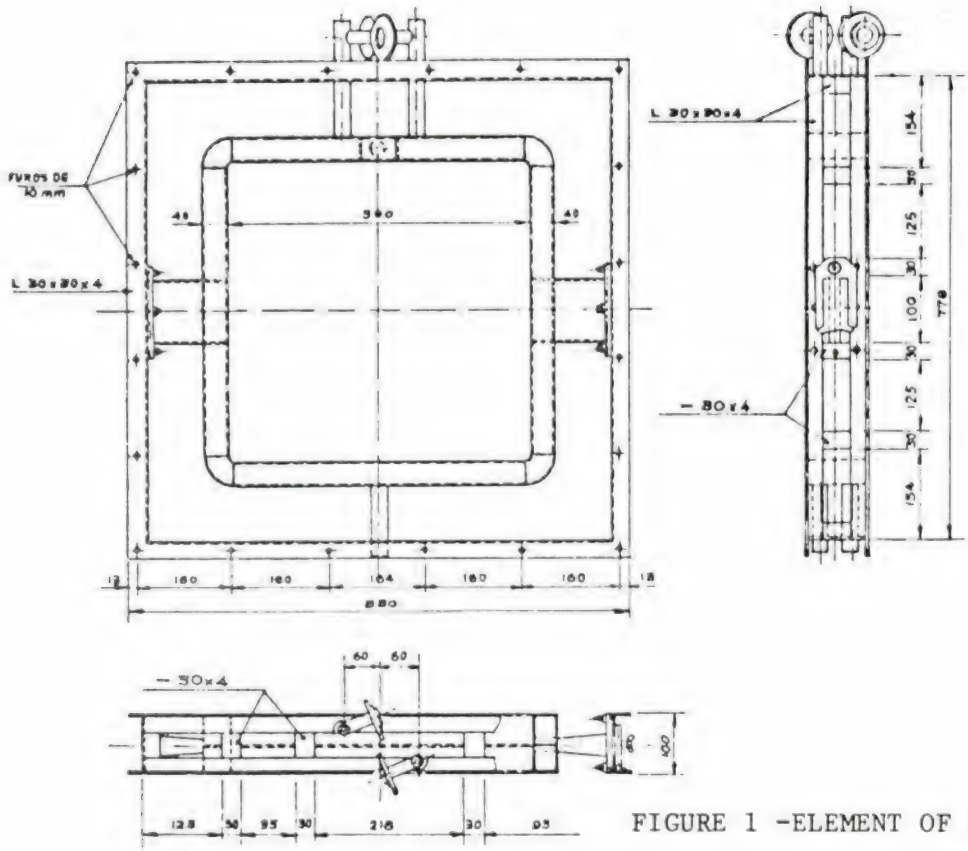


FIGURE 1 -ELEMENT OF FURNACE

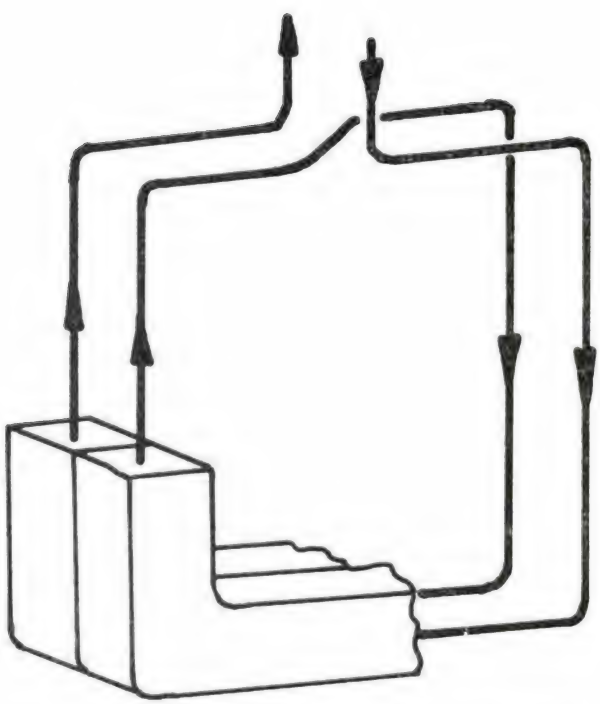


Figure 2 — Cooling circuit within a single element

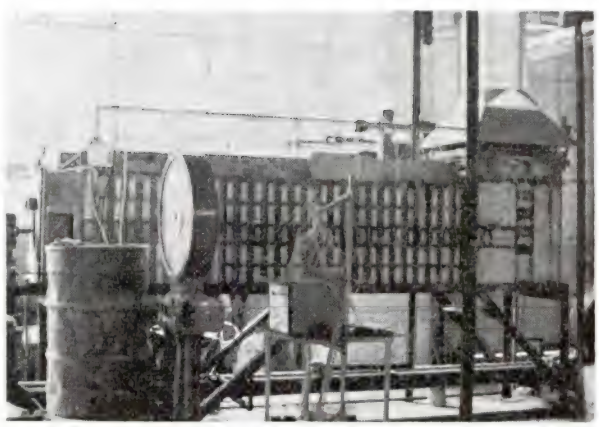


Figure 3 — Overall view of the furnace

The fuel is measured by a weighting method. Its temperature is controled in two steps to keep a constant value at the burner outlet.

The cooling water temperature is measured at the inlet and outlet of each element through thermocouples inserted in a well around which the flow section is substantially reduced to minimize thermal lag and conduction errors. The thermocouples are connected to one automatic potentiometer and from time to time checked against a precision instrument. The thermocouples are connected in a differential way and the global error is checked against the overall temperature difference measured between the inlet and outlet temperatures of the cooling water. Gas temperature and composition are measured at the outlet section after a mixing bafle. A continuous sampling and recording system is used for CO, CO_2, O_2, SO_2.

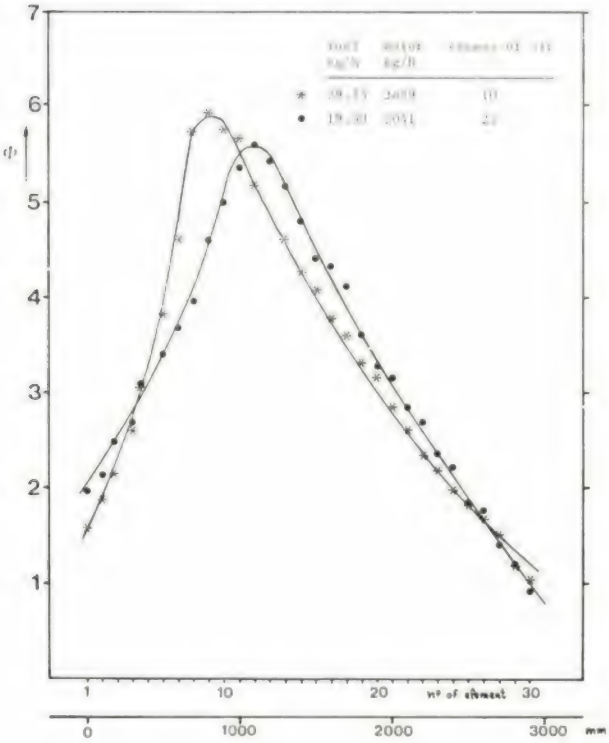


Figure 4 — Influence of Load on local heat flux

PRELIMINARY TESTS AND RESEARCH PROGRAM

Trial tests have been conducted during several months to calibrate the instruments, improve the heat balance and to get familiarity with the dynamics of the furnace. The total heat balance according to the ASME boiler test code is usually closed within 4 ~ 5 % which accounts for radiation and unaccounted losses. Most of the tests have been conducted with an automatic cup atomizing burner of the type commercially available for tube fired boilers. The aim was to measure the heat flux distribution versus excess air and load. Fig. 4, 5 show some results. These are plots in a conventional way, showing in the abcissa the length along the furnace and in ordinate a non dimensional heat flux expressed as a percentage of total heat imput. This type of burner showed little flexibility in what concerns load and low excess air. In this test the whole surface is cooled and the refractory cone which should surround the burner according to its manufacturer was not used. Due to the bad atomizing characteristics and unfavorable flow field some unburned fuel accumulated in the bottom of the furnace which is reflected in the error of closure of the heat balance.

The effect of swirl on pressure jet flames is presently under study and will be reported later.

The experimental results got in this furnace will be used in connection with a basic research project in the turbulence structure of swirling jets and computer programs developed for boundary layers, and two and three dimensional flows coupled with heat and mass transfer and chemical reaction (Ref. 1, 4). In a separate paper it is shown how droplet trajectories will be predicted and used (Ref. 2).

Due to the flexibility in design of the furnace, corrosion studies and heat transfer to convection banks are easily dealt with. Differences in temperature between sections and its influence on heat transfer by radiation are feasible because each section can be independently cooled. In connection with this application it is probably worth mentioning the

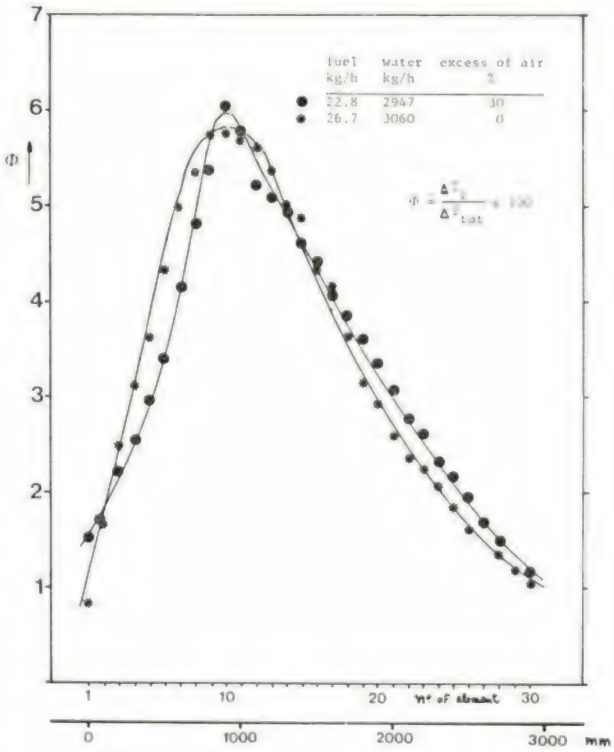


Figure 5 — Influence of excess of air on local heat flux

problems which can arise with heated circuits either in series or parallel if the main pressure drop is at the outlet or in the heated parts themselves: for certain flow regimes the flow becomes unstable. The phenomena is well explained even in a pure static way (Ref. 3); when considered dynamically, new modes of instability occur. This furnace can show the phenomena easily in a controled way varying the inlet and outlet localized pressure drops, even without vaporization in the circuit. This type of phenomena has been considered at the design stage both to avoid it in heat transfer studies and also to promote it when necessary to investigate dynamic characteristics of the cooling flow.

ACKNOWLEDGEMENTS

The experimental data shown and most of the preliminary tests where conducted by M. Machado of L. E. M. and is gratefully acknowledged. Thanks are also due to General Director M. Vicente for continuous support and permission to publish, and to A. Cabral, head of the laboratory and J. J. Costa for all help concerning the assembly of the furnace and the experimental runs.

REFERENCES

1 — J.J.D. Domingos — Development of a numerical solution procedure for three dimensional turbulent flows — Euromech Colloquium 33 — Technische Universitat Berlin — 1972.

2 — J.J.D. Domingos, L.C. Roriz — Dynamics of an evaporating drop — European Symposium on Combustion, Sheffield, 1973.

3 — J.J.D. Domingos — Estabilidade e repartição dos escoamentos em superfícies de aquecimento com circulação forçada — Técnica n.º 331 — 1963.

4 — M.N.R. Nina — Transporte de massa em jactos coaxiais, turbulentos — 1.º Congresso de Mecânica Teórica e Aplicada, Dezembro 1974.

NÚMERO 437 DEZEMBRO DE 1976 ANO LI VOLUME XXXVIII

C. D. U. 536.24:620.197:697.8

Transferência de calor em regime estacionário em chaminés (Análise e Resolução Numérica)

J. M. BRISSON LOPES
Assistente do IST
Bolseiro do CTAMFUL (INIC)

RESUMO

O presente trabalho surgiu da necessidade do conhecimento da temperatura e velocidade dos gases à saída duma chaminé conhecidos os seus valores na base. Tais valores são importantes para a previsão da dispersão de poluentes emitidos pelas chaminés para a atmosfera. Analisa-se a transferência de calor entre os gases e o exterior das chaminés. Calculam-se os coeficientes de transmissão superficial de calor e as propriedades do ar a 760 mmHg. Realizou-se assim um programa para cálculo da temperatura dos gases ao longo da chaminé, da sua velocidade na base e no topo e os perfis de temperatura nas paredes interior e exterior. Analisam-se seguidamente alguns casos reais, sendo tratado o problema da corrosão de chaminés metálicas.

ABSTRACT

The prevision of the dispersion of airborne chimney or stack effluents requires that the temperature and the speed of the gases at the top of the stack should be known. This paper presents a way of computing those values given the temperature at the bottom, the mass flow rate of the gases and the caracteristic stack dimensions. An analysis of the heat transfer between the flue gases and the outside of the stack is made. The heat transfer coeficients and the properties of air at 29.92 inches of Hg are calculated. A computer program was developped. This program computes the longitudinal temperature profiles of gases and of the inside and the outside stack surfaces, and the gas speed at the top and bottom of stacks. The last part of this paper analyses a few real cases and presents an example of prevision of minimum inside stack surface temperature, an important parameter for preventing acid corrosion in metalic stacks.

1. INTRODUÇÃO

Nos estudos de dispersão de poluentes emitidos por chaminés para a atmosfera dois dos dados essenciais numa situação prática concreta são o conhecimento da temperatura e da velocidade dos gases à saída da chaminé. A medição directa do valor da temperatura é em muitos casos difícil ou mesmo impraticável, e raras são as instalações que se encontram preparadas para o fazer. Tanto quanto é do nosso conhecimento não existe neste momento no nosso país nenhuma instalação com essa possibilidade de medida.

Por outro lado a temperatura de saída dos gases da chaminé é dependente de vários factores atmosféricos como a temperatura ambiente e a velocidade do vento. Estes factores não são constantes embora deles se possam tomar valores médios. Um outro factor que afecta grandemente aquela temperatura é o caudal dos gases expelido pela chaminé.

Os ábacos que existem para o cálculo da temperatura de saída são construídos em função da altura e diâmetro da chaminé e da temperatura a que os gases nela entram. Qualquer variação da espessura das paredes altera as condições de transmissão de calor e portanto a temperatura que nos interessa.

Para a resolução do problema foi desenvolvido um programa em linguagem BASIC para o calculador Hewlett-Packard 9830A. O programa pode ser obtido no Centro de Termodinâmica Aplicada e Mecânica dos Fluidos das Universidades de Lisboa (antigo Núcleo de Estudos de Engenharia Mecânica). Este programa permitiu obter resultados respeitantes a uma chaminé de betão que se compararam com outras fontes. Foi também possível abordar o problema da determinação da temperatura mínima da parede interna duma chaminé metálica.

2. CONSIDERAÇÕES GERAIS

2.1. Sobre Transmissão de Calor

O problema da transmissão de calor através e ao longo das paredes duma chaminé é fundamentalmente um problema bidimensional visto que suporemos que existe uma simetria radial. Esta hipótese é feita por se desprezarem os efeitos da insolação e se supor que a atmosfera nas imediações da chaminé se encontra toda à mesma temperatura.

O regime de transmissão de calor é suposto permanentemente e portanto, teremos para a chaminé

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2}+\frac{1}{r}\frac{\partial T}{\partial r}+\frac{1}{r^2}\frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial Z^2}=0$$

que devido à condição de simetria radial ($\frac{\partial T}{\partial \theta}=0$) é

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2}+\frac{1}{r}\frac{\partial T}{\partial r}+\frac{\partial^2 T}{\partial Z^2}=0$$

Se o gradiente axial de temperatura for aproximadamente constante, o termo $\frac{\partial^2 T}{\partial Z^2}$ pode ser desprezável em relação aos outros termos. Pelos resultados obtidos podemos concluir à posteriori que a hispótese é válida. Assim, em geral, é

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2}+\frac{1}{r}\frac{\partial T}{\partial r}=0$$

pelo que o problema pode ser considerado unidimensional.

Como condições fronteiras teremos no interior o fluído constituído pelos gases a uma determinada temperatura e no exterior o ar atmosférico a outra temperatura.

2.2. Natureza dos gases

Estequiometricamente uma combustão exige quantidades fixas de combustível e comburente, que no caso que estamos a tratar é o oxigénio. Na prática, no entanto, não se fornece ao combustível só a quantidade de ar que contém exactamente a quantidade de oxigénio necessária à combustão completa duma determinada quantidade de combustível, pois para concentrações de oxigénio inferiores a um dado valor é muito difícil fazê-lo chegar à zona onde se está dando a combustão. Assim, torna-se imperativo que exista um excesso de ar, o que acarreta a consequência de nem todo o oxigénio ser substituído por CO_2 e pelos outros produtos menores da combustão. A concentração destes produtos no ar diminui pois, com o aumento de excesso de ar.

Tomando como exemplo um teor de CO_2 de 10 % podemos comparar o que acontece à composição gravimétrica.

		Composição normal		Com 10 % CO_2	
	Peso molecular	Fracção molar	Peso molecular Parcial	Fracção molar	Peso molecular parcial
O_2	32,000	0.2095	6,704	0,1098	3,514
N_2	28,016	0,7809	21,878	0,7809	21,878
A	39,944	0,0093	0,371	0,0093	0,371
CO_2	44,01	0,0003	0,013	0,1000	4,401
		1,0000	28,966	1,000	30,164

Como se poderá concluir os gases que neste caso se escoariam pela chaminé pouco diferem do ar quanto a propriedades físicas globais pelo que, com boa aproximação, poderemos considerar o efluente com as propriedades físicas do ar. Esta hipótese será adoptada em todo o trabalho.

3. ANÁLISE DA TRANSMISSÃO DE CALOR

3.1. Algumas notas preliminares

Esta secção trata o problema de transmissão de calor entre os gases quentes que circulam no interior da chaminé e a atmosfera exterior a esta. Esta análise é efectuada por meio de balanços térmicos nos subsistemas locais do sistema total que é a chaminé. Este processo foi adoptado devido ao escoamento interior da chaminé ser turbulento o que torna impossível um tratamento fácil das equações de movimento e consequentemente a determinação de perfis de temperatura. Para evitar tais inconvenientes convencionou-se adoptar para temperatura dos gases a sua temperatura de mistura adiabática (bulk temperature) T_b que em escoamentos interiores a condutas de secção circular e supondo conhecidos os perfis de velocidade e temperatura é,

$$T_b=\frac{\langle V_z\ T\rangle}{\langle V_z\rangle}=\frac{\int_0^{2\pi}\int_0^{R} v_z(r)T(r)r\,dr\,d\theta}{\int_0^{2\pi}\int_0^{R} v_z(r)r\,dr\,d\theta}$$

As determinações dos coeficientes de transmissão de calor e das propriedades dos gases são supostas completamente definidas pelo que o seu tratamento é deixado para secções posteriores.

Os regimes do escoamento e de transmissão de calor são considerados permanentes.

3.2. Temperaturas de referência

Como as propriedades dos gases são fortemente dependentes da temperatura e esta varia de ponto para ponto é necessário definir a temperatura a que aquelas se deverão determinar.

Quando se trate de propriedades envolvidas na transferência de calor de gases para um meio sólido tomaremos como temperatura de referência a média das temperaturas que caracterizam o processo ou a

temperatura de mistura. Assim entre os gases da chaminé e a parede interior teremos

$$Ti_{ref} = T_b$$

sendo

Ti_{ref} — temperatura de referência interior
T_b — temperatura de homogeneização dos gases da chaminé

Para a transferência de calor entre a parede exterior e a atmosfera a temperatura de referência local é

$$Te_{ref} = \frac{T_\infty + T_e}{2}$$

sendo

Te_{ref} — temperatura do filme exterior
$T\infty$ — temperatura da atmosfera não afectada
Te — temperatura da parede exterior

Quando for necessário calcular propriedades do fluído características do escoamento no interior da chaminé a temperatura a utilizar será também a temperatura de homegeneização (T_{bulk}).

3.3. Significado das grandezas médias

Este parágrafo tem cabimento uma vez que o escoamento interior não é um escoamento isotérmico através de secções constantes, pois em chaminés a forma é geralmente cónica.

Uma vez que se trata dum escoamento permanente o caudal mássico de gases é constante em qualquer secção que se considere. Vamos considerar duas quaisquer delas que sejam suficientemente próximas (ver fig. 1).

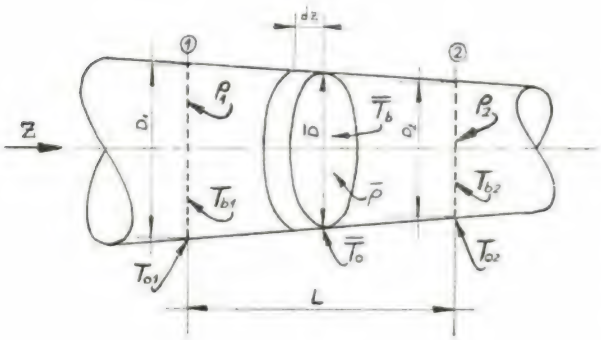


figura 1

Uma unidade elementar de massa de gases dM percorre o trajecto entre as secções 1 e 2, tendo nestas secções as propriedades que na figura se indicam.

Supondo que a variação de qualquer temperatura (a da parede interior, por exemplo) é linear ao longo de cada secção é imediato que os valores médios se verifiquem na secção média. Portanto as grandezas que vão entrar no cálculo dos balanços térmicos são grandezas que se referem à secção média de cada um dos troços.

3.4. Balanço térmico

Tomando uma secção elementar duma chaminé, obtida pela intersecção desta com dois planos paralelos a uma distância elementar um do outro e perpendiculares ao eixo da chaminé (veja-se a fig. 1) obtemos o que se pode considerar um tubo cilíndrico oco de raio interior r_1 e raio exterior r_2.

O tubo é composto por n camadas concêntricas de condutibilidades térmicas $K_1, K_2, \ldots, K_n$. Os raios intermédios são definidos do modo como a figura 2 mostra. Desprezaremos as resistências de contacto.

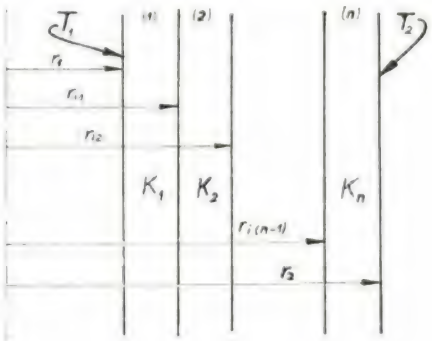


figura 2

Sendo T_1 e T_2 respectivamente a temperatura da superfície interior e a temperatura da superfície exterior e com T_1 maior que T_2, o fluxo de calor que passa do interior para o exterior numa secção de altura ΔZ é

$$q = \frac{2\pi (T_1 - T_2)\,\Delta Z}{\frac{1}{K_1}\ln\frac{r_{i1}}{r_1} + \frac{1}{K_2}\ln\frac{r_{i2}}{r_{i1}} + \ldots + \frac{1}{K_n}\ln\frac{r_2}{r_{i(n-1)}}} \qquad (3.1)$$

Dos gases que circulam na chaminé para a parede interior o fluxo de calor é devido à acção conjunta da convecção e da radiação. Supondo que os gases se encontram à temperatura média $\overline{T}_b$, atrás definida, a expressão do fluxo é da forma

$$q = 2\pi r_1\,\Delta Z\,\left[h_1(\overline{T}_b - T_1) + \epsilon_1\,\sigma(\overline{T}_b^4 - T_1^4)\right] \qquad (3.2)$$

sendo

h_1 — coeficiente de convecção entre os gases e a parede interior
ϵ_1 — emissividade da superfície interior

O fluxo de calor entre a parede exterior e a atmosfera deve-se também à convecção e à radiação e a sua expressão é

$$q = 2\pi r_2 \Delta Z \left[h_2(T_2 - T_{ar}) + \epsilon_2 \sigma (T_2^4 - T_{ar}^4)\right] \quad (3.3.)$$

sendo

T_{ar} — temperatura do ar atmosférico não perturbado

h_2 — coeficiente de convecção entre a parede exterior e a atmosfera

ϵ_2 — emissividade da superfície exterior

A determinação dos coeficientes h_1 e h_2 é tratada na secção 4.

Ao atravessar o troço de tubo os gases sofrem um abaixamento de temperatura ΔT_b. Denotando por T_{b1} a temperatura de referência à entrada do troço elementar e continuando a supor que a variação de temperatura ao longo do troço é linear, a temperatura média de referência $\overline{T}_b$ é

$$\overline{T}_b = T_{b1} - \frac{\Delta T_b}{2} \quad (3.4)$$

Significado análogo a $\overline{T}_b$ se atribui a T_1 e T_2.

Ao atravessar então o troço os gases cedem a quantidade de calor

$$q = \rho \pi r_1^2 \Delta Z C_p \Delta T_b \times \frac{1}{\Delta t}$$

ρ e C_p são determinados à temperatura média de referência $\overline{T}_b$ e Δt o tempo necessário para renovar completamente os gases que se encontram no interior do troço elementar considerado. Assim é

$$\Delta t = \frac{\Delta Z}{V}$$

sendo V a velocidade média dos gases no troço. A equação toma a forma

$$q = \rho \pi r_1^2 \Delta Z C_p \Delta T_b \frac{V}{\Delta Z} = \rho \pi r_1^2 C_p \Delta T_b V$$

por seu lado o caudal mássico dos gases é

$$G = \rho V \pi r_1^2$$

ou seja

$$V = \frac{G}{\rho \pi r_1}$$

donde

$$q = C_p G \Delta T_b \quad (3.5)$$

Os valores de q em (3.1), (3.2), (3.3) e (3.5) são iguais pelo que podemos formar o seguinte sistema de equações

$$\begin{cases} 2\pi r_2 \Delta Z \left[h_2 (T_2 - T_{ar}) + \varepsilon_2 \sigma (T_2^4 - T_{ar}^4)\right] = \\ = \dfrac{2\pi (T_1 - T_2)}{\lambda} \Delta Z \\ 2\pi r_1 \Delta Z \left[h_1 (\overline{T}_b - T_1) + \varepsilon_1 \sigma (\overline{T}_b^4 - T_1)\right] = \\ = \dfrac{2\pi (T_1 - T_2)}{\lambda} \Delta Z \\ C_p G \Delta T_b = \dfrac{2\pi (T_1 - T_2)}{\lambda} \Delta Z \end{cases}$$

$$\text{sendo } \lambda = \frac{1}{K_1} \ln \frac{r_{i1}}{r_1} + \frac{1}{K_2} \ln \frac{r_{i2}}{r_{i1}} + \ldots + \frac{1}{K_n} \ln \frac{r_2}{r_{i(n-1)}} \quad (3.6)$$

ou seja

$$\begin{cases} h_1 (\overline{T}_b - T_1) + \varepsilon_1 \sigma (\overline{T}_b^4 - T_1^4) - \dfrac{T_1 - T_2}{r_1 \lambda} = 0 \\ h_2 (T_2 - T_{ar}) + \varepsilon_2 \sigma (T_2^4 - T_{ar}^4) - \dfrac{T_1 - T_2}{r_2 \lambda} = 0 \\ C_p G \Delta T_b - \dfrac{2\pi (T_1 - T_2)}{\lambda} \Delta Z = 0 \end{cases}$$

Introduzindo agora a equação (3.4) ter-se-á

$$\begin{cases} h_1 (T_{b1} - \dfrac{\Delta T_b}{2} - T_1) + \varepsilon_1 \sigma \left[(T_{b1} - \dfrac{\Delta T_b}{2})^4 - T_1^4\right] - \\ - \dfrac{2 (T_1 - T_2)}{d_1 \lambda} = 0 \\ h_2 (T_2 - T_{ar}) + \varepsilon_2 \sigma (T_2^4 - T_{ar}^4) - \dfrac{2 (T_1 - T_2)}{d_2 \lambda} = 0 \\ C_p G \Delta T_b - \dfrac{2\pi (T_1 - T_2)}{\lambda} \Delta Z = 0 \end{cases} \quad (3.7)$$

que é um sistema algébrico não linear de 3 equações a 3 incógnitas (T_1, T_2 e ΔT_b).

Neste sistema existem várias funções que dependem das temperaturas, que são:

$$h_1 = h_1(\overline{T}_b) = h_1\left(T_{b1} - \frac{\Delta T_b}{2}\right)$$

$$h_2 = h_2\left(\frac{T_2 + T_{ar}}{2}\right)$$

$$C_p = C_p(\overline{T}_b) = C_p\left(T_{b1} - \frac{\Delta T_b}{2}\right)$$

Como já foi dito a determinação destas funções é tratada noutro local. Também noutro local é tratado o problema da determinação de K_i no caso duma camada de ar.

4. DETERMINAÇÃO DOS COEFICIENTES DE TRANSMISSÃO DE CALOR DO AR

4.1 Caso duma lâmina de ar

Existem normalmente lâminas de ar no interior das paredes de chaminés. Estas lâminas não podem ser tratadas simplesmente com base em fenómenos de convecção. No entanto e para manter a generalidade da equação (3.6) pode definir-se uma condutibilidade equivalente.

Devido ao facto de na generalidade dos casos a espessura da lâmina ser pequena em relação aos seus diâmetros máximo e mínimo poderemos considerar que o problema é o da transmissão de calor entre duas placas planas paralelas com ar de permeio e teremos a geometria da figura 3.

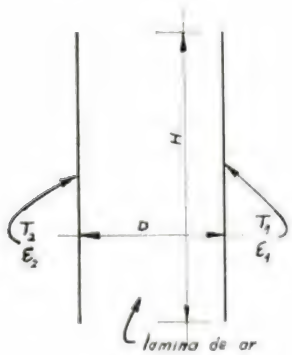


figura 3

Sendo a temperatura de referência para a convecção a média de T_1 e T_2 teremos que o número de Nusselt é dado por $Nu = Ra^n$ sendo C e n duas constantes dependente de Ra.

Ra	C	n	
2×10^3 a $2{,}1\times10^5$	0,2 $(D/H)^{1/9}$	1/4	regime laminar
$2{,}1\times10^5$ a $1{,}1\times10^{12}$	0,071 $(D/H)^{1/9}$	1/3	regime turbulento

Como $q_{conv} = h(T_1 - T_2)$ é-nos possível definir a condutibilidade equivalente $K' = \frac{h}{D}$.

Por outro lado a radiação contribui com um fluxo (ver [2] pág. 447) e supondo o ar transparente à radiação o que é mais ou menos exacto

$$q_{rad} = \sigma \frac{(T_1^4 - T_2^4)}{1/\varepsilon_1 + 1/\varepsilon_2 - 1}$$

define-se então a condutibilidade equivalente K'' que é tal que

$$q_{rad} = K'' \frac{T_1 - T_2}{D}$$

e portanto

$$K'' = \sigma \frac{(T_1^4 - T_2^4)}{1/\varepsilon_1 + 1/\varepsilon_2 - 1} \quad \frac{D}{T_1 - T_2}$$

a condutibilidade global equivalente é então

$$K_{eq} = K' + K''$$

Os seus valores variam conforme D e a temperatura de referência do espaço de ar. Para maior comodidade transcrevemos a tabela fornecida por [14] para tal efeito.

Condutibilidade térmica equivalente [W/m K]

Temperatura média (°C)	Espessura da lâmina de ar (cm)					
	5	6	8	10	12	15
0	0,26	0,31	0,42	0,55	0,67	0,86
50	0,38	0,47	0,63	0,80	0,98	1,24
100	0,56	0,67	0,91	1,15	1,40	1,76
200	1,08	1,29	1,73	3,34	2,62	3,30
300	1,86	2,23	2,98	3,73	4,37	5,63

Tabela 4.1

4.2. Convecção do calor dos gases para a superfície interior da chaminé

O número de Reynolds de transição dum escoamento interior a um tubo tem o valor aproximado de 2100 e a transição estende-se até aproximada-

mente 10 000. Se notarmos que numa chaminé as velocidades de escoamento dos gases são raramente inferiores a 1 m/s e que as suas temperaturas são da ordem dos 300° C, somos levados a concluir que bastará que o diâmetro interior da chaminé seja superior a 10 cm para que nos encontremos em regime turbulento no interior de condutas circulares.

A mesma razão levou-nos a desprezar os efeitos da convecção natural por a velocidade axial ser suficiente para a tornar desprezável.

Foram recolhidas 8 equações de Nu em função de Re e Pr para regime turbulento dentro duma conduta cilíndrica das quais 3 são teóricas. Em [5] obtivemos as expressões teóricas que são

— Prandtl $$Nu = \frac{0{,}0396\, Re^{3/4}\, Pr}{1 + 2{,}44\, Re^{-1/8}\,(Pr - 1)} \qquad (4.1)$$

que fornece bons resultados para $Pr \simeq 1$

— Hoffman $$Nu = \frac{0{,}0396\, Re^{3/4}\, Pr}{1 + 1{,}5\, Pr^{-1/6}\, Re^{-1/8}\,(Pr - 1)} \qquad (4.2)$$

que é uma modificação da expressão de Prandtl e cujas propriedades são calculadas a T_{bulk}.

— Von Karman

$$Nu = \frac{0{,}0396\, Re^{3/4}\, Pr}{1 + 0{,}955\, Re^{-1/8}\left\{(Pr - 1) + \ln\left[1 + \frac{5}{6}(Pr - 1)\right]\right\}} \qquad (4.3)$$

As expressões recolhidas que provêem de experimentação são

— Nusselt

$$Nu = 0{,}036\, Re^{0{,}8}\, Pr^{1/3} \left(\frac{\mu}{\mu_\omega}\right)^{0{,}14} \left(\frac{D}{L}\right)^{1/16} \qquad (4.4)$$

— Mac Adams $Nu = 0{,}023\, Re^{0{,}8}\, Pr^{n}$ (4.5) com $n = \begin{cases} 0{,}4 \text{ fluido a aquecer} \\ 0{,}3 \text{ fluido a arrefecer} \end{cases}$

que é recomendada para gases a temperaturas inferiores a 33° C

— Sieder e Tate $$Nu = 0{,}027\, Re^{0{,}8}\, Pr^{1/3} \left(\frac{\mu}{\mu_\omega}\right)^{0{,}14} \qquad (4.6)$$

que se pode aplicar a gases a temperatura superior a 33° C e para os quais $0{,}7 < Pr < 16{,}7$

— Dittus e Boelter

$$Nu = 0{,}0243\, Re^{0{,}8}\, Pr^{0{,}4} \text{ ao aquecer o fluido} \qquad (4.7)$$

$$Nu = 0{,}0265\, Re^{0{,}8}\, Pr^{0{,}3} \text{ ao arrefecer o fluido}$$

aplicável quando $10^4 < Re < 1{,}2 \times 10^5$

— Colburn $$Nu = 0{,}023\, Re^{0{,}8}\, Pr^{1/3} \qquad (4.8)$$

Para todas estas expressões calculam-se as propriedades do fluido a T_{bulk} exceptuando-se a equação (4.8) para a qual apenas C_p é calculado àquela temperatura sendo as restantes propriedades calculadas a T_{film}.

As expressões (4.5) e (4.6) são propostas por [5], enquanto [9] apresenta (4.6) e (4.4). Finalmente (4.7) e (4.8) são propostas por [18]. De notar que (4.6) é recomendado tanto por [5] como por [9] citando ambas o facto de Mac Adams a recomendar.

Para verificar qual a expressão que melhor se pode adoptar ao problema presente escolhemos um caso típico em que a temperatura de homogeneização do fluido é de 200° C e a temperatura de filme é de 190° C. Fizemos a representação gráfica (1) para valores do número de Reynolds entre 14×10^5 e 10^6 e depois a comparação com valores medidos para o ar apresentados em [5]. Daqui resultou que as equações que mais se parecem aproximar dos valores experimentais para o ar são as equações (4.6) e (4.7). Em função das citações recolhidas resolvemos adoptar a equação de Sieder e Tate.

4.3. Transmissão de calor num escoamento perpendicular a um cilindro

Existem várias expressões do número de Nusselt em função do número de Reynolds para a transmissão de calor dum cilindro para um fluido em escoamento perpendicular a ele. Numas os coeficientes são constantes e noutras dependem de Re, embora todas tenham sido obtidas experimentalmente.

As seguintes soluções são citadas em [8]

— Mac Adams

$$Nu = \frac{h\,D}{K_{film}} = 0{,}32 + 0{,}43 \left[\frac{\rho_\infty V_\infty D}{\mu_{film}}\right]^{0{,}52} \qquad (4.9)$$

ou $Nu \simeq 0{,}32 + 0{,}43\, Re^{0{,}52}$

que é válida para $0{,}1 < Re < 1000$ e foi posteriormente modificada por Eckert e Soehngen

— Eckert e Soehngen

$$Nu = 0{,}43 + 0{,}48 \left[\frac{\rho_\infty V_\infty D}{\mu_{film}}\right]^{1/2} \qquad (4.10)$$

que segundo [18] apresenta um desvio de 4 % em relação à solução de Hilpert (ver adiante). Douglas e Churchill afirmaram no entanto que estas duas correlações anteriores estavam erradas e propuseram uma nova correlação. Mas HSU sugere que é válida para $Re < 500$.

(1) Ver apêndice 1.

— Douglas e Churchill

$$Nu = \frac{h\,D}{K_{film}} = 0{,}46 \left[\frac{D V_\infty}{\nu_{film}}\right]^{1/2} + 0{,}00128 \left[\frac{D V_\infty}{\nu_{film}}\right] \tag{4.11}$$

que se aplica a regimes com $500 < Re < 10^6$

— Colburn

$$j_H = \frac{h}{\rho_{film}\, C_{film}\, V_\infty} \left[\frac{C_p\, \mu}{K}\right]^{2/3} = Nu\ Re^{-1}\ Pr^{-1/3} \tag{4.12}$$

j_H encontra-se representado graficamente em [2] donde é possível retirar valores para interpolação que deixa de ser válida para $Re > 10^5$ devido a transição de regime.

— Ulsamer $\quad Nu = C\, Re^m\, Pr^n \quad (4.13)$

Re	C	m	n
0,1 a 50	0,91	0,385	0,31
50 a 10 000	0,60	0,500	0,31

para a temperatura de referência T_{film}

— Hilpert $\quad Nu = C\, Re^m$ (só para o ar) $\quad (4.14)$

Re	C	m
1 a 4	0,891	0,330
4 a 40	0,821	0,385
40 a 4000	0,615	0,466
4 000 a 40 000	0,174	0,618
40 000 a 400 000	0,0299	0,805

a temperatura de referência é T_{film} e estes valores foram obtidos com ar mais ou menos homogéneo. Esta expressão é citada conjuntamente por [5], [9] e [18].

Para comparação foram executadas duas representações gráficas de (4.10), (4.11), (4.12) e (4.14), uma para $100 < Re < 2{,}5 \times 10^5$ e outra, que pode ser considerada uma extrapolação, para $2{,}5 \times 10^5 < Re < 1{,}5 \times 10^6$. (Ver apêndices 2 e 3).

Destas representações podemos concluir que até $Re = 500$ qualquer das soluções é válida e que a partir de $Re = 6000$ a solução (4.10) afasta-se francamente das outras. Também para $Re > 10^5$ a solução (4.12) se afasta das restantes como a restrição ao seu uso fazia prever.

Parece, portanto, que tanto (4.11) e (4.14) são fiáveis. A solução de Hilpert foi por nós adoptada pois que interpreta mais fielmente as mudanças de regime que os resultados experimentais relevaram existir para os valores aproximados de 4, 40, 4×10^3 e 4×10^4 do número de Reynolds.

Outras soluções como as de L. V. King [9], Reither [9] e uma outra de Hilpert [18] não foram consideradas pois os seus domínios de aplicação são muito restritos.

4.4. Correcções aplicáveis às equações

Como a temperatura não é a mesma em todos os pontos num mesmo instante poderá haver lugar para a correcção de valores do número de Nusselt calculados, pois as propriedades dos gases variam fortemente com a temperatura. Segundo Kays e London [10] os valores do número de Nusselt calculados a T_{bulk} deverão ser corrigidos por meio de

$$\frac{Nu}{Nu_{bulk}} = \left[\frac{T_\omega}{T_{bulk}}\right]^n \quad \text{em vez de} \quad \left[\frac{\mu_\omega}{\mu_{bulk}}\right]^n$$

com os valores de temperatura expressos em temperatura absoluta e aplicável quando

$$0{,}33 < \frac{T_\omega}{T_{bulk}} < 3{,}0$$

Ainda segundo os mesmos autores, para escoamentos turbulentos completamente desenvolvidos no interior de tubos cilíndricos em que os gases são arrefecidos o expoente n toma o valor zero pelo que não é necessário aplicar qualquer correcção.

Assim a equação de Sieder e Tate adoptada em 3.2. toma a forma

$$Nu = 0{,}027\ Re^{0{,}8}\ Pr^{1/3}$$

Subsiste ainda o problema da influência da região de entrada. Das equações representadas, apenas (4.4) apresenta o factor que realiza essa correcção. Segundo Mac Adams a correcção que se aplica à equação de Sieder e Tate é

$$\frac{h}{h_\infty} = 1 + \left[\frac{D}{L}\right]^{0{,}7}$$

pelo que a equação de Sieder e Tate foi adoptada na seguinte forma final

$$Nu = 0{,}027\ Re^{0{,}8}\ Pr^{1/3} \left[1 + \left(\frac{D}{L}\right)^{0{,}7}\right]$$

O efeito da região de entrada é sensível pelo que deve ser considerada.

5. DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES DO AR

Para que o estudo dos fenómenos de convecção no ar seja feito de uma forma precisa é necessário que possamos calcular as suas propriedades com

um certo rigor, mais a mais quando, como era o caso, se pretende escrever um programa para cálculo em computador. Assim, teve-se o cuidado de utilizar formas simples e facilmente calculáveis mantendo no entanto a precisão.

Segundo [15] as propriedades do ar (viscosidade dinâmica, condutibilidade térmica e calor específico a pressão constante) são muito pouco influenciadas pela variação de pressão e os desvios que se podem verificar são muito pequenos para variações da ordem $\pm$ 0,1 atm. Isto significa que os valores calculados para 760 mmHg podem ser aplicados entre 684 mmHg e 836 mmHg. Este intervalo é muito maior que o intervalo de variação da pressão atmosférica nos níveis baixos da atmosfera.

Para valores de referência tomaram-se os valores tabelados em [20] para a viscosidade e para a condutibilidade térmica; em [13] para o calor específico.

5.1. Massa específica

Aplicou-se directamente a lei de Charles e Gay-Lussac

$$\rho T = C^{te}$$

e de acordo com [15] $C^{te} = \rho_o T_o = 1{,}2929 \times \times 273{,}15$ Kg K m^{-3}. Este valores são apresentados nesse trabalho tendo como fonte o Handbook of Chemistry and Physics, The Chemical Rubber Co. (1969/70).

5.2. Viscosidade dinâmica

É utilizada a fórmula de Sutherland sob a forma

$$\mu = \mu_0 \frac{T_o + 273{,}15 + C}{T + 273{,}15 + C} \left[\frac{T + 273{,}15}{T_o + 273{,}15} \right]^{3/2} [\text{Ns m}^{-2}]$$

utilizada por [15] em que a constante C é, de acordo com as recomendações de V. Vasilesco, citado em Pascal P., «Nouveau Traité de Chimie Minérale», Tome I, Masson e Cie. (1956),

$$C = \frac{T}{1627} \times 11 + 113$$

sendo T em °C. O valor de μ_o é

$$\mu_0 = 1{,}716 \times 10^{5} \quad \text{Ns m}^{-2}$$
$$T_o = 0°C$$

Esta fórmula provou ter desvios mínimos em relação aos valores tabelados em [20] e é mais exacta que os apresentados por [5] a págs. 37 com as constantes da tabela A. 10 da mesma e por [20] a págs 308.

5.3. Condutibilidade térmica

De acordo com a teoria cinética dos gases a condutibilidade térmica do ar segundo [3] é

$$K = \epsilon \, Cv \, \mu$$

Como o cálculo desta expressão não é expedito, tal como o processo indicado em [17], tentou-se aplicar a expressão fornecida em [11] que face aos valores tabelados em [20] apresentou desvios significativos. Assim resolveu-se aplicar aproximações dos valores de [20] por meio de polinómios. Foram ensaiadas as aproximações por meio de polinómios simples pelo programa para este efeito de [8] e por séries de polinómios de Chebyshev segundo [4]. Ambas as aproximações se revelaram excelentes, mas devido à necessidade de se proceder a uma transformação de coordenadas na série de polinómios de Chebyshev preferiu-se o polinómio simples devido à sua maior rapidez e facilidade de cálculo pois o grau dos polinómios é pequeno. Assim $K = a_3 T^3 + a_2 T^2 + a_1 T + a_0$ em W/mK com T em Kelvin e

$$a_0 = -3{,}25942 \times 10^{-3}$$
$$a_1 = 1{,}25808 \times 10^{-4}$$
$$a_2 = -1{,}1141 \times 10^{-7}$$
$$a_3 = -6{,}85634 \times 10^{-11}$$

Esta aproximação é válida para o intervalo

$$275 \text{ K} \leqslant T \leqslant 550 \text{ K}$$

5.4. Calor específico

Na determinação do calor específico foram inicialmente testadas as fórmulas apresentadas em [7] e [15] cujos desvios em relação aos valores tabelados em [13] eram apreciáveis.

Tal como para a condutibilidade térmica optou-se pela aproximação polinominal que forneceu a seguinte fórmula

$C_p = a_4 T^4 + a_3 T^3 + a_2 T^2 + a_1 T + a_0$ em J/kg K sendo

$$a_0 = 991{,}610492$$
$$a_1 = 0{,}175710352$$
$$a_2 = -1{,}0434 \times 10^{-3}$$
$$a_3 = 2{,}51071 \times 10^{-6}$$
$$a_4 = -1{,}6474 \times 10^{-9}$$

Esta aproximação é válida para o intervalo

$$275 \text{ K} < T < 550 \text{ K}$$

6. ALGUNS RESULTADOS

Nesta secção analisam-se alguns resultados obtidos pelo programa que se comparam com valores obtidos por outros meios.

Foi usada como modelo uma chaminé de betão de acordo com [14].

Caudal de gases		0,5 Kg/s
Altura		19 m
Diâmetro médio		0,65 m
Espessura betão		0,15 m (base), 0,1 m (cimo)
caixa de ar		0,05 m (»), 0,05 m (»)
refractário		0,05 m (»), 0,05 m (»)
Temperatura ambiente		20° C
Temperatura dos gases à entrada da chaminé		200° C
Condutibilidades térmicas	betão	1 W/mK
	caixa de ar	0,6 W/mK
	refractário	0,08 W/mK
Velocidade do vento		3 m/s
Pressão atmosférica		760 mmHg

De acordo com os ábacos de [16] e [19] os gases devem sair da chaminé a 173,9° C e 171° C. Atendendo a que se trata de ábacos tomaremos um valor médio para referência ou seja 172,5° C. Realizado o cálculo obteve-se para a temperatura de saída dos gases da chaminé o valor de 184° C. Portanto a precisão que podemos obter ao utilizar ábacos é escassa e tem origem no facto de para o uso destes ábacos serem necessários apenas a temperatura de entrada dos gases na chaminé e o diâmetro desta. Adiante ver-se-á que outros factores condicionam a temperatura de saída dos gases.

6.1. Erro devido à altura das secções

No cálculo atrás referido cada secção teve uma altura de 0,5 m. Realizaram-se dois testes nos quais as secções tinham 0,2 m de altura num e 1 m noutro. As duas temperaturas calculadas foram iguais (183,9° C) e as velocidades de saída dos gases coincidiam nos três casos.

6.2. Efeito devido à temperatura exterior

Foi efectuado um ensaio em que a temperatura exterior era de 10° C em vez de 20° C. A temperatura calculada foi 183,0° C e a velocidade de saída dos gases passou de 3,886 m/s a 3,900 m/s. A tiragem passou de —7,717 mmH_2O para —8,516 mmH_2O. É possível concluir que a temperatura exterior pouco influencia o processo.

6.3. Velocidade do vento

Além do ensaio normal (a 3 m/s) realizaram-se outros a 10 m/s e a 20 m/s. Os resultados podem comparar-se na tabela 6.1.

velocidade do vento [m/s]	3	10	20
tiragem [mm H_2O]	—7,717	—7,707	—7,707
temperatura de saída dos gases [°C]	184,0	183,5	183,3
velocidade de saída dos gases [m/s]	3,894	3,900	3,889

Tabela 6.1

A conclusão é que a velocidade do vento pode ser desprezada sem que se cometa um erro apreciável.

6.4. Influência do caudal

Caudal [Kg/s]	0,25	0,5	0,75	1,00	3,00
Tiragem [mm H_2O]	—8,086	—7,717	—6,780	—5,395	+20,044
Temperatura de saída dos gases [°C]	169,4	184,0	189,0	191,7	197,2
Velocidade de saída dos gases [m/s]	1,885	3,894	5,906	7,920	24,040
Velocidade/caudal	7,54	7,79	7,87	7,92	8,01

Tabela 6.2

Verifica-se assim que uma variação de caudal pode trazer uma alteração bastante sensível na temperatura de saída dos gases, como aliás era de esperar.

Os ábacos, no entanto, não estão preparados para este tipo de condições.

6.5. Influência dos materiais e sua espessura

Nos testes realizados mantiveram-se sempre o diâmetro interno, a altura da chaminé e as espessuras do betão. Fizeram-se variar as espessuras do material refractário e da caixa de ar e num caso ainda se fez variar a condutibilidade térmica do refractário.

Condutibilidade do refractário [W/mK]	0,08	0,08	0,08	0,08	0,15
Espessura do refractário [m]	0,05	0,1	0,05	0,1	0,05
Espessura da caixa de ar [m]	0,05	0,05	0,1	0,1	0,05
Tiragem [mm H_2O]	—7,717	—7,793	—7,727	—7,797	—1,613
Temperatura de saída dos gases [°C]	184,0	189,8	184,8	190,1	176,3
Velocidade de saída dos gases [m/s]	3,894	3,944	3,901	3,947	3,829

Tabela 6.3

Os resultados apresentados na tabela 6.3 provam que a temperatura de saída dos gases da chaminé está fortemente dependente da espessura do material refractário e da sua condutibilidade térmica, podendo apresentar valores bastante afastados uns dos outros.

7. CORROSÃO EM CHAMINÉS METÁLICAS

Na secção anterior verificou-se que a variação da espessura dos materiais usados (principalmente os refractários) e do caudal dos gases afectam sensivelmente a temperatura de saída dos gases. É evidente que a temperatura mínima da parede interior da caminhé acompanha a variação da temperatura dos gases e portanto o problema torna-se crítico se se estiver a trabalhar uma gama de temperaturas próxima da zona de condensação de gases corrosivos.

Gills e Lee realizaram um estudo [21] sobre uma chaminé metálica com um isolamento de 1 1/2" de lã de rocha. Este estudo compreendeu a medição da temperatura de saída dos gases e da temperatura mínima da parede interna da chaminé. Efectuaram também o cálculo dstas duas temperaturas por via teórica.

A chaminé foi ensaiada nas seguintes condições:

Altura útil	81 ft.
Diâmetros internos	4 ft 8,5" à entrada
	4 ft a 18 ft de altura
	2 ft 6" de 23 ft de altura até ao cimo
Espessura 1.ª placa de aço	2 mm
lã de rocha	1 1/2"
2.ª placa de aço	2 mm
Condutibilidades aço	43,27 W/m K
lã de rocha	0,04864 W/m K
Velocidade média do vento	3 m/s
Pressão atmosférica	760 mm Hg

A temperatura dos gases à entrada da chaminé dependia da carga pedida à fornalha a que a chaminé estava ligada. Assim, os problemas de corrosão surgiam quando a fornalha trabalhava a carga reduzida.

Os ensaios que realizámos com o programa de cálculo permitiram-nos obter duas curvas de temperatura mínima da parede interna, uma para 10°C (50°F) e outra para -1,1°C (30°F). Os resultados obtidos levam a uma muito boa concordância entre os valores medidos por Gills e Lees e os valores por nós calculados, o que vem confirmar a grande fiabilidade dos nossos cálculos e permitem a sua aplicação prática com resultados seguros. A figura 4 é bem a prova disso.

Finalmente e a título documental inclui-se uma tabela comparativa entre os resultados de [21] e os por nós obtidos.

Plena carga

		nossos valores	Gills e Lee
Gases	temperatura à entrada	187,8°C	187,8°C
	temperatura à saída	183,5°C	183,9°C
Temperatura mínima do metal		176,2°C	170,0°C

Carga reduzida

Gases	temperatura à entrada	171,1°C	171,1°C
	temperatura à saída	152,0°C	158,9°C
Temperatura mínima do metal		135,3°C	132,8°C

AGRADECIMENTOS

Queremos aqui deixar os nossos agradecimentos ao Prof. J. J. Delgado Domingos pelo apoio concedido durante a realização deste trabalho.

BIBLIOGRAFIA

[1] American Institute of Physics Handbook, American Institute of Physics, Mc Graw-Hill Book, Co., New York, 8rd. edition 1972.

[2] BIRD, R.B.; STEWART, W.E.; LIGHTFOOF, E.N., Transport Phenomena, John Wiley & Sons, New York, London 1960.

[3] BRAZÃO, J.; MOTA, J., Transmissão de Calor e Massa I («Folhas da cadeira»), I.S.T., Lisboa. 1973.

[4] CADETE, M.O.R.; CADETE, A.M.E., Sistema de Programação Fortran II, 2.ª edição, Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, 1970.

[5] CHAPMAN, A. J., Heat Tranfer, 3 rd. edition, MacMillan Publishing Co., New York, 1974.

[6] DETRIE, J.P., La Pollution Atmosphérique, Dunod, Paris, 1969.

[7] HAMBLIN, F.D., Abridged Thermodynamic and Thermochemical Tables (SI Units), Pergamon Press, Oxford, 1971.

[8] HEWLETT — PACKARD Calculator 9830A Mathematical Pack, Hewlett-Packard Products Division, Loveland, Colorado.

[9] JAKOB, M., Heat Transfer, Vol. I, John Wiley & Sons, New York, 8th. edition, 1962.

[10] KAYS, W.M.; LONDON A.L., Compact Heat Exchangers, 2nd. edition, McGraw Hill Book Co., New York, 1964.

[11] KERN, D.Q.; KRAUS, A.D., Extended Surface Heat Transfer, McGraw Hill Book Co., New York, 1962.

[12] LOPES, J.M.B. A Subroutine for Solving Non-linear Algebraic Systems of Nonlinear Equations (Using Brown's Modified Method), NEEM, Report RC/43, Instituto de Alta Cultura, Lisboa, 1974.

[13] MAYHEW, Y.R.; ROGERS, G.F.C., Thermodynamic and Transport Properties of Fluids (SI Units), Basil Blackwell, Oxford, 1971.

[14] MORAL, F., Hormigon Armado, 6. edition, Editorial Dossat, Madrid, 1962.

[15] MOTA, J.; BRAZÃO, J., Subprogramas Fortran para a determinação de algumas propriedades físicas da água e do ar, Publicações do

Laboratório de Física e Engenharia Nucleares, Sacavém, Portugal, 1972.

[16] PERRY, R.H.; CHILTON, C.H.; KIRKPATRICK, S.D., Chemical Engineers Handbook, MacGraw Hill Book Co., New York, 1963.

[17] REID, R.C.; SHERWOOD, T.K., The Properties of Gases and Liquids, Their Estimation and Correlation.

[18] SHAO TI HSU, Engineering Heat Transfer, D. Van Nostrand Co., New Jersey, 1963.

[19] STEAM, Its Generation and Use, Babcock & Wilcox Co., 1972.

[20] VASSERMAN, A.A.; KAZAVCHWSKII, Y.Z.; RABINOVICH, V.A., Thermophysical Properties of Air and Air Components, Translated from Russian by Israel Program for Scientific Translations, Teplofizicheskie svoistva vozdukha i ego komponentov, Izclatel'stvo «Nauka», Moskva, 1966.

[21] GILS, B.G.; LEES, B., Design and Operation of an Insulated Sted Chimney, Symposium on «Chimney Design», The Institute of Fuel, London, 1966.

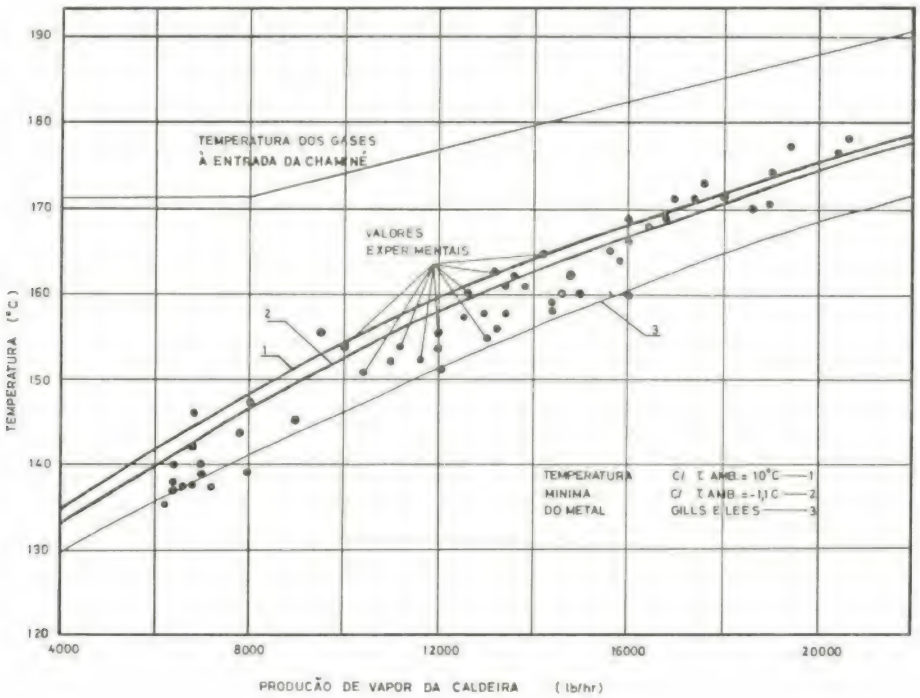
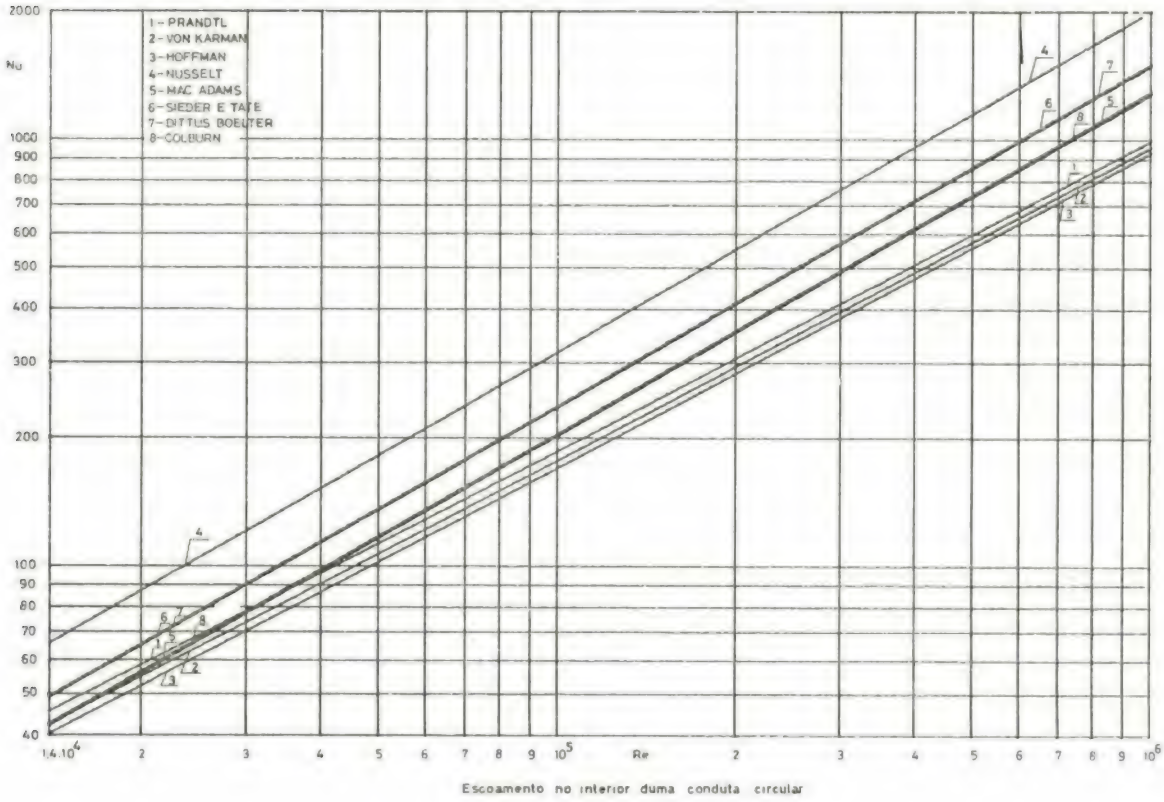
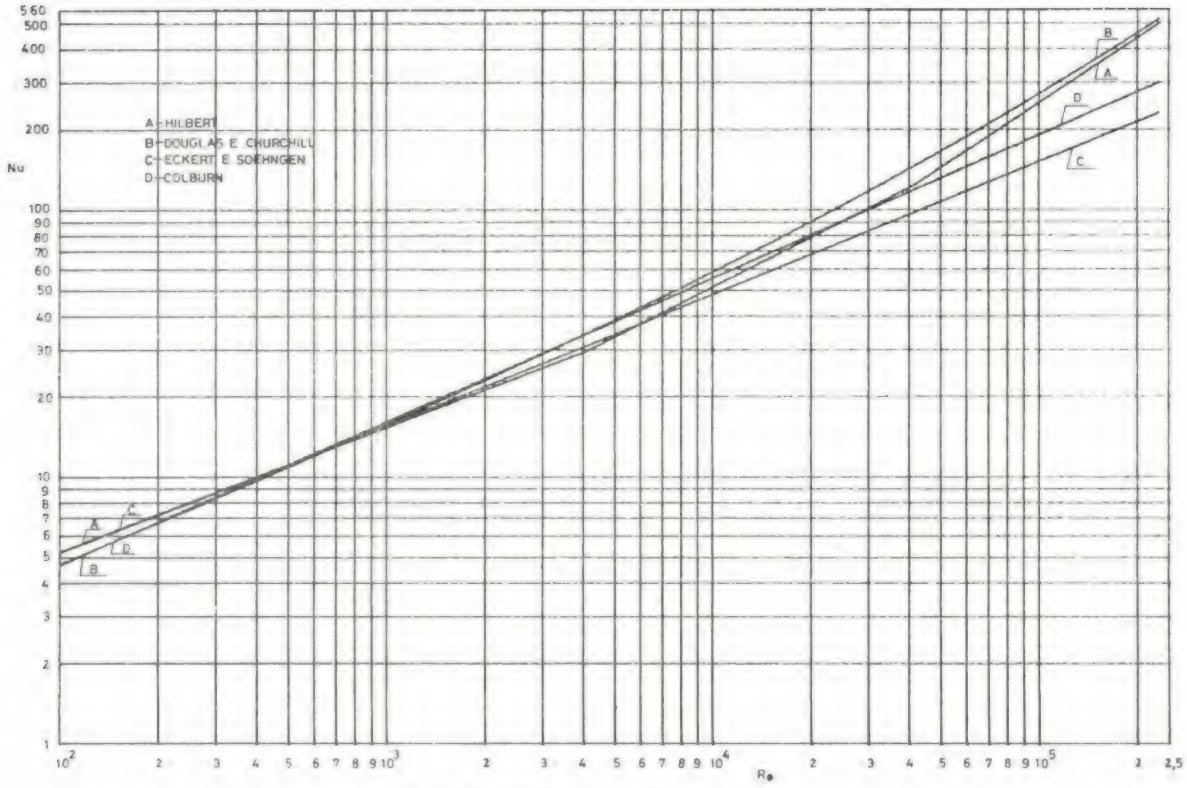


FIG. 4



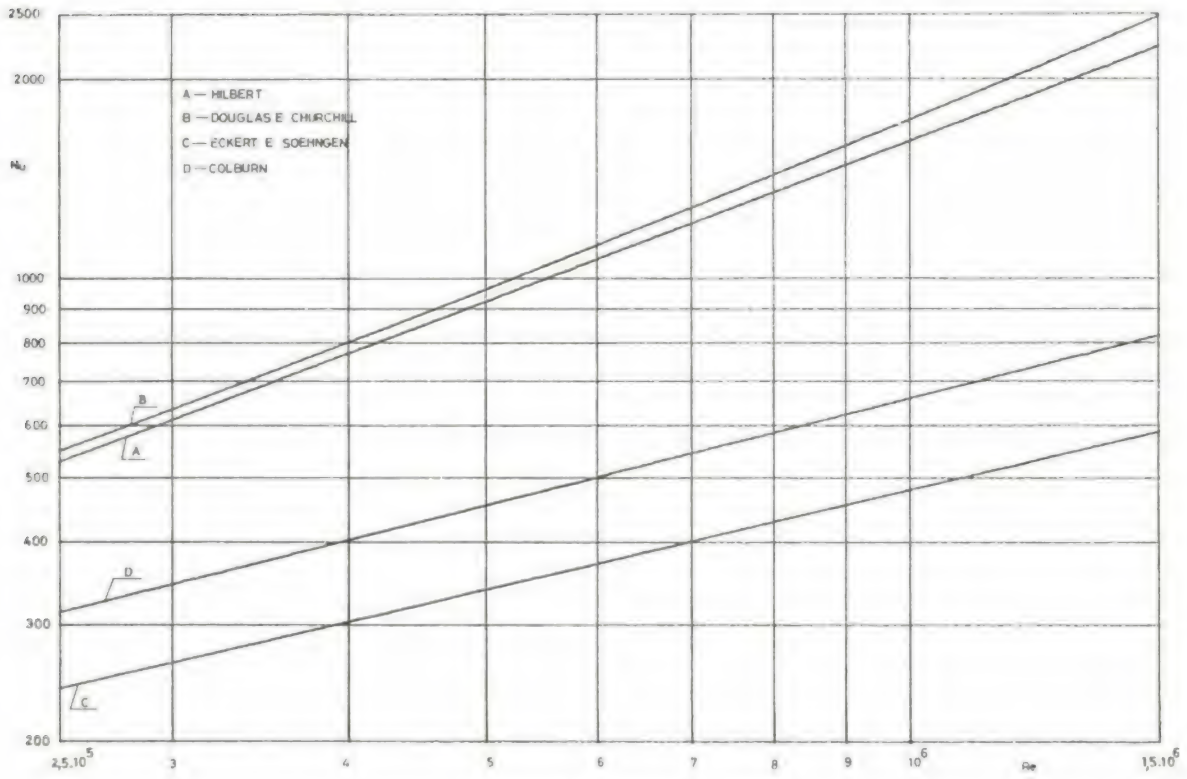
Escoamento no interior duma conduta circular

ANEXO I



Escoamento perpendicular a um cilindro

ANEXO 2



Escoamento perpendicular a um cilindro

ANEXO 3

NÚMERO 437 DEZEMBRO DE 1976 ANO LI VOLUME XXXVIII

C. D. U. 628.5

Factores do dimensionamento duma chaminé emissora de poluentes

M. TERESA PONTES
Eng.ª Químico-Industrial (IST)
Investigador do IST — CTAMFUL

RESUMO

Neste trabalho descreve-se sucintamente o cálculo da altura duma chaminé emissora de poluentes e acentuam-se os pontos críticos: concentrações máximas de poluentes a admitir no solo, condições meteorológicas e sobre-elevação da pluma.

Como exemplo da sensibilidade do modelo às condições de cálculo apresenta-se o dimensionamento da chaminé principal da Refinaria da Petrosul em Sines.

ABSTRACT

We briefly describe the calculation of the height of a pollutant emission stack. The critical points are stressed: maximum ground pollutant concentration, meteorological conditions and plume rise.

As an example of the model's sensivity to the input variables, we present the calculation of the Petrosul Refinery's main stack.

1. GENERALIDADES

O dimensionamento duma chaminé de modo a assegurar a diluição adequada dos constituintes nocivos é um processo em que é necessário ter em conta um conjunto de variáveis mutuamente dependentes.

Os principais constituintes duma emissão gasosa são N_2, CO_2, O_2 e vapor de água. Para além destes, geralmente considerados inócuos, e conforme o processo que dá origem à emissão da pluma, podem existir em pequena escala outros constituintes susceptíveis de causar problemas a homens, animais, plantas ou materiais se a sua concentração exceder um certo valor. Um dos mais vulgares, senão o mais comum, é o SO_2 presente nos gases de combustão de combustíveis fósseis líquidos e sólidos.

O SO_2 é o efluente cuja presença tem sido objecto de maior atenção não só pelo perigo que ele mesmo representa mas também porque a sua concentração na atmosfera é normalmente tomada como índice do estado geral da poluição no local.

Para que a concentração dum constituinte normalmente perigoso emitido por uma chaminé seja suficientemente baixa no receptor vários processos se podem usar:

1. Limitar o teor do poluente na emissão
2. Tratar os efluentes à saída da chaminé
3. Utilizar uma altura adequada da emissão de modo a aproveitar a capacidade dispersante da atmosfera:
   a) elevando a chaminé
   b) aumentando a velocidade e temperatura de saída dos gases.

O processo mais comum e do qual nos ocuparemos neste trabalho é o recurso a uma elevação adequada da pluma, embora em princípio a utilização dum processo não exclua a dos outros.

As características de turbulência da atmosfera promovem a dispersão dos gases nela introduzidos. Quanto maior for a altura a que se dá a emissão de poluente, mais diluída chegará a pluma ao solo.

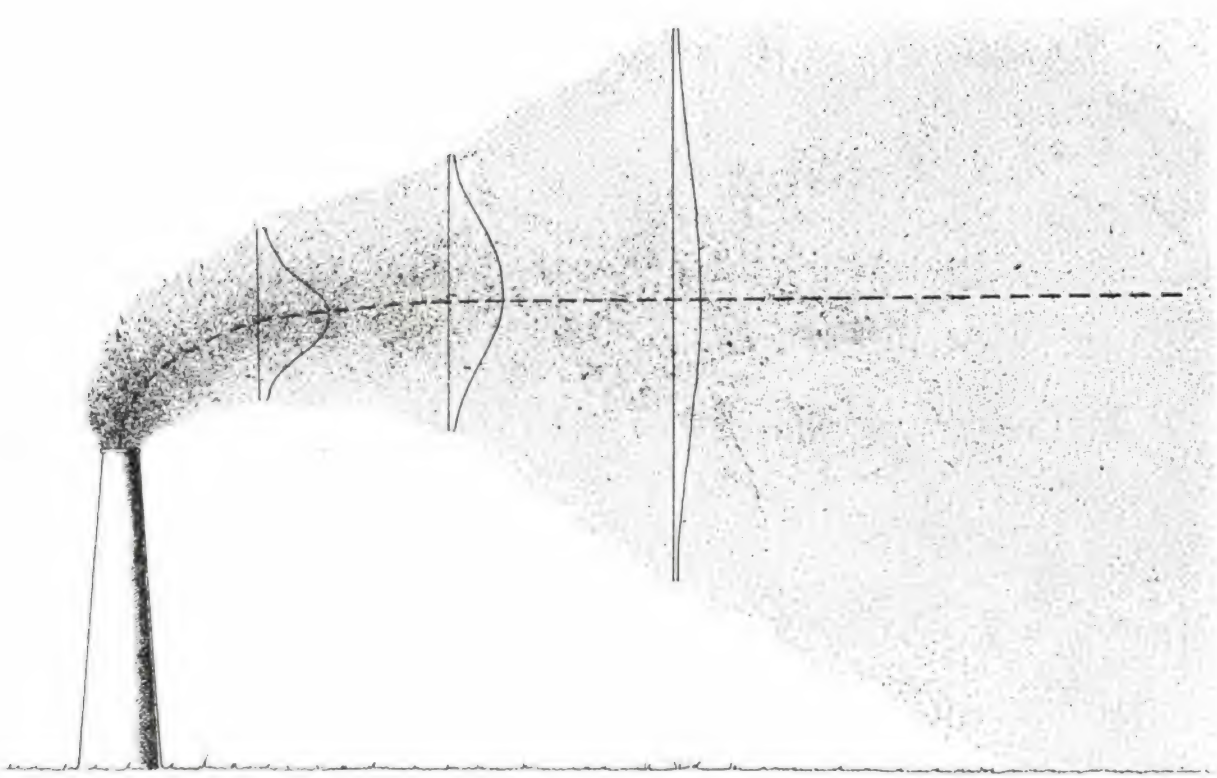


Fig. 1

Dispersão de poluentes emitidos por uma chaminé

Em princípio, elevando a chaminé seria sempre possível obter a diluição necessária no solo. No entanto não será realizável uma chaminé de 600 m, por exemplo, além de que a capacidade de dispersão da atmosfera diminui com a altitude e com as inversões de temperatura, frequentes a algumas centenas de metros.

Por outro lado, as muito altas chaminés (300 m), embora permitam evitar concentrações indesejáveis no solo na zona circundante, podem lançar os poluentes na circulação geral da atmosfera que os transporta a regiões distantes. Será então necessário limitar a emissão dos poluentes (processos 1. e 2.).

Um caso bem conhecido é o da Suécia. Segundo Fisher (1975) a contribuição britânica para a deposição média anual se SO_2 na Suécia é 10 %, a sueca 20 % e os restantes 70 % são provenientes de fontes da Europa Central e da deposição natural.

2. MÉTODO DE CÁLCULO DA ALTURA DUMA CHAMINÉ

O método de cálculo da altura duma chaminé envolve 3 fases.

2.1. Estabelecimento da concentração máxima de poluente a admitir no solo

Para a previsão dos efeitos nocivos duma emissão gasosa tem sido comprovada a prática corrente que consiste em calcular a localização e amplitude da concentração máxima a admitir no solo — CMS — de poluentes perigosos. Só em casos muito especiais é que esta concentração terá que ser considerada a nível diferente do do solo.

A concentração observada depende do tempo durante o qual se faz a média, diminuindo com o aumento desta.

Embora seja fundamental a existência de regulamentação sobre valores máximos de concentração a admitir no solo, em Portugal não existem normas nem sequer valores indicativos recomendados pelo que se tem recorrido a legislação estrangeira.

2.2. Cálculo da elevação total da pluma

O cálculo da elevação total da pluma — chamada altura efectiva da chaminé — de modo a que a concentração máxima de poluente no solo tenha um determinado valor é efectuado através dum modelo de dispersão turbulenta de poluentes, considerando a chaminé como uma fonte pontual contínua elevada.

Os modelos analíticos utilizados decorrem da resolução da equação da dispersão turbulenta introduzindo algumas drásticas simplificações mediante

as quais a equação se torna linear, obtendo-se uma solução analítica gaussiana [1]. Os modelos mais correntes deste tipo são o de Sutton (1947) e o de Pasquill-Gifford (1961).

Tanto num modelo como noutro a concentração à distância x da fonte segundo a direcção do vento depende de:

1. altura efectiva da chaminé
2. velocidade do vento
3. parâmetros empíricos definindo a dispersão atmosférica nos planos horizontal e vertical
4. taxa de emissão do poluente

A forma geral dum modelo gaussiano que calcula a concentração no solo segundo o eixo da pluma emitida por uma fonte pontual contínua elevada é:

$$C(x, o, o) = \frac{Q}{\pi \sigma_y \sigma_z u} \exp\left(-\frac{H^2}{2\sigma_z^2}\right) \qquad (1)$$

Q — taxa de emissão da pluma
u — velocidade média do vento (m/s)
H — altura efectiva da chaminé (m)
σ_y, σ_z — desvio padrão da concentração do poluente nos planos transversal e vertical; são função da distância à fonte e estabilidade aerodinâmica da atmosfera (m)

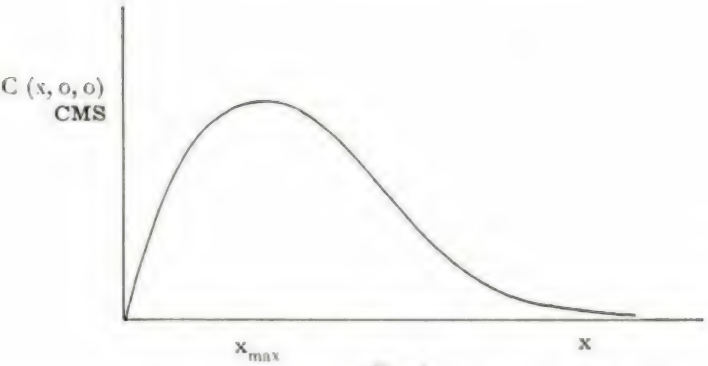


Fig. 2
Modelo Gaussiano — Concentração de poluente no solo, segundo o eixo da pluma

Sutton apresentou a equação (1) numa forma diferente usando em vez dos desvios padrão da concentração σ_y e σ_z os parâmetros de difusão C_y e C_z e o parâmetro de turbulência n relacionados por

$$\sqrt{2\sigma_y} = C_y x^{1-n/2}$$
$$\sqrt{2\sigma_z} = C_z x^{1-n/2}$$

Os valores experimentais para C_y e C_z e n são menos detalhados e completos que os de Pasquill-Gifford para σ_y e σ_z que se baseiam numa série grande de experiências. Estes autores apresentaram uma classificação da estabilidade aerodinâmica da atmosfera em 6 classes—da extremamente instável A à moderadamente estável F—baseada em medidas de insolação e vento à superfície, sendo σ_y e σ_z apresentados sob a forma gráfica. O modelo de Pasquill-Gifford tem sido extensamente utilizado em cálculos de dispersão de poluentes atmosféricos e de material radioactivo sendo recomendado pelos manuais de cálculo da ASME (1968), da U. S. Atomic Energy Commission (1968) e de Turner (1970).

A base experimental do modelo de Pasquill-Gifford é muito mais sólida e extensa do que a do modelo de Sutton no que se refere aos valores dos parâmetros de dispersão. Martin & Barber realizaram uma quantidade de trabalho experimental que permite relacionar os valores calculados pelo modelo de Sutton com os valores medidos no solo da concentração máxima de SO_2 na região em que ocorre o máximo de concentração, para diferentes tempos de amostragem.

Em relação ao modelo de Pasquill-Gifford não é do nosso conhecimento a existência de dados experimentais que permitam a conversão dos valores calculados pelo modelo para diferentes tempos de amostragem. Quando aplicado a situações de poluição urbana é normal considerar a concentração calculada pelo modelo de Pasquill-Gifford como a média de 1 hora. A directiva VDI 2289 citada por Détrie (1969) dá a correspondência entre as concentrações detectadas com tempos de amostragem diferentes (entre 3 minutos e 4 dias) para o SO_2 emitido por uma fonte isolada em terreno plano e sem construções, admitindo para a concentração uma lei normal.

Para calcular H é necessário definir as condições meteorológicas da zona e a sua duração. Quando as emissões são baixas, as inversões a pequena altitude originam as maiores concentrações no solo que podem persistir mais de 1 hora. Para emissões elevadas, enquanto as condições de instabilidade atmosférica ocasionam no solo altas concentrações de curta duração, a atmosfera neutra com ventos de velocidade e direcção variáveis está na base da maior parte das ocorrências de níveis elevados de poluentes no solo.

O cálculo da altura efectiva da chaminé H baseia-se na resolução da equação (1) para a concentração máxima a admitir no solo e condições meteorológicas que conduzam às mais graves situações de poluição.

2.3. Cálculo da Altura Geométrica da Chaminé

A altura atingida pelo eixo da pluma gasosa emitida por uma chaminé é geralmente denominada

(1) A solução das equações completas do escoamento e dispersão turbulentos dos poluentes na atmosfera tem sido entre nós objecto de investigação. Foram desenvolvidos e testados métodos numéricos que permitem resolver as equações parabólicas às derivadas parciais que regem o fenómeno. Entre outros, citam-se os trabalhos de Domingos e Filipe (1972) e Santos e Filipe (1972).

altura efectiva da chaminé H e pode ser considerada como a soma de duas parcelas: a altura geométrica da chaminé h_c e a sobreelevação Δh.

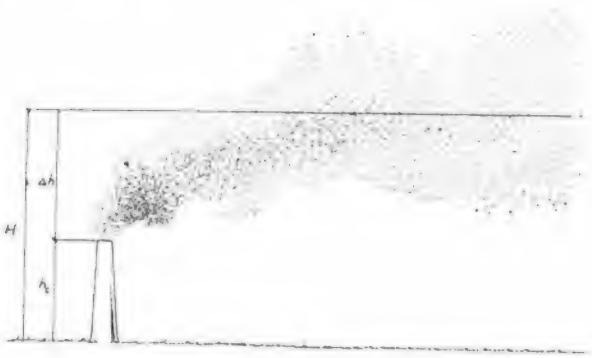


Fig. 3
Sobreelevação da pluma e altura efectiva da chaminé

$$H = h_c + \Delta h \qquad (3)$$

A sobreelevação Δh é devida a dois fenómenos independentes: quantidade de movimento vertical ligada à velocidade de saída dos gases e impulsão de origem térmica devido à menor densidade dos gases que são emitidos a temperatura superior à atmosférica. Conforme os casos, domina um ou outro fenómeno sendo comum — caso das centrais térmicas, por exemplo — Δh ser fundamentalmente determinado pela impulsão térmica.

Os factores que afectam Δh são a velocidade média do vento, a temperatura da pluma, as características geométricas da chaminé e a velocidade de saída dos efluentes.

A sobreelevação da pluma é gradual verificando-se, para efeitos práticos, um nivelamento a 10 alturas de chaminé (10 h_c). Como este estudo se baseia na estimativa da CMS, define-se altura efectiva da emissão como a altura da pluma sobre o ponto de concentração máxima.

Para o cálculo de Δh têm sido desenvolvidas várias fórmulas—cerca de 20—com condições de aplicação diferentes e dando muitas vezes resultados contraditórios. Briggs (1969) apresenta um bom resumo da situação. Domingos (1973) analisa e compara algumas das fórmulas mais usadas que fundamentam os regulamentos de construção de chaminés de diversos países. No mesmo trabalho constata-se também que «...examinando os vários métodos, não deixa de obter-se a convicção de que na maioria dos casos existiu subjacente uma altura de chaminé a não exceder e cujo valor se procurou justificar». [Na Fig. 4 apresenta-se a comparação das fórmulas de cálculo de alturas de chaminés de países diversos, observando-se uma dispersão apreciável dos valores obtidos].

Dentre as fórmulas existentes têm conhecido mais sucesso as de Holland — regulamento dos U. S. A. (EPA) — Bosanquet, Stümke — regulamento alemão — Concawe, Lucas e Briggs. A fórmula de Briggs — equação (4) — é baseada em análise dimensional, contrariamente à de Lucas, do Concawe e de Holland que são puramente empíricas. A de Briggs é a mais bem fundamentada teoricamente e a que melhor concordância apresenta com medidas experimentais para diferentes tipos de emissão. A de Stümke — equação (5) — tem uma extensa validação experimental e apresenta bons resultados para potências médias mas dá valores baixos para potências elevadas.

$$\Delta h = 2.0\ F^{1/3}\ u^{-1}\ x^{2/3} \qquad (4)$$

em que $F \simeq 3.8\ E\text{-}5\ Q_H$

$$\Delta h = 1.5\ w\ d\ u^{-1} + 65\ d^{5/2}\ u^{-1}\ (\Delta T/T_s) \qquad (5)$$

Δh — sobreelevação da pluma (m)
F — fluxo de impulsão
Q_H — potência térmica emitida pela chaminé (cal/s)
u — velocidade média do vento à altura da emissão (m/s)
x — distância à chaminé segundo a direcção do vento (m)
d — diâmetro da chaminé (m)
w — velocidade de saída dos gases da chaminé (m/s)
ΔT — diferença de temperatura entre os gases à saída da chaminé e o ar ambiente (°K)
T_s — temperatura dos gases à saída da chaminé (°K)

3. APLICAÇÃO A UM CASO CONCRETO — CHAMINÉ PRINCIPAL DA REFINARIA DA PETROSUL

O dimensionamento da chaminé principal da Refinaria da Petrosul em Sines é um caso com algum interesse e que exemplifica como se podem obter resultados muito diferentes a partir do mesmo modelo variando um pouco as condições de cálculo.

Foi-nos proposto pelo Gabinete da Área de Sines o dimensionamento da referida chaminé e foram-nos facultados os dados de projecto — características geométricas da chaminé e da emissão e alguns dados sobre a meteorologia da região.

Numa primeira fase foi acordado o cálculo da altura da chaminé usando o modelo de Pasquill-Gifford, a fórmula de Stümke para a sobreelevação e considerando a atmosfera extremamente instável — classe A de Pasquill. A concentração média máxima a admitir no solo foi estabelecida pelo GAS em 250 $\mu g/m^3$ de ar para um tempo de amostragem correspondente ao do modelo usado sem qualquer correcção, i. e., 1 hora. Como seria de esperar o resultado foi extremamente exigente: chaminé muito elevada e redução drástica do teor de enxofre a admitir no combustível.

Numa segunda fase repetimos o estudo em condições de menor instabilidade atmosférica — classe B — e sendo a CMS corrigida pela tabela

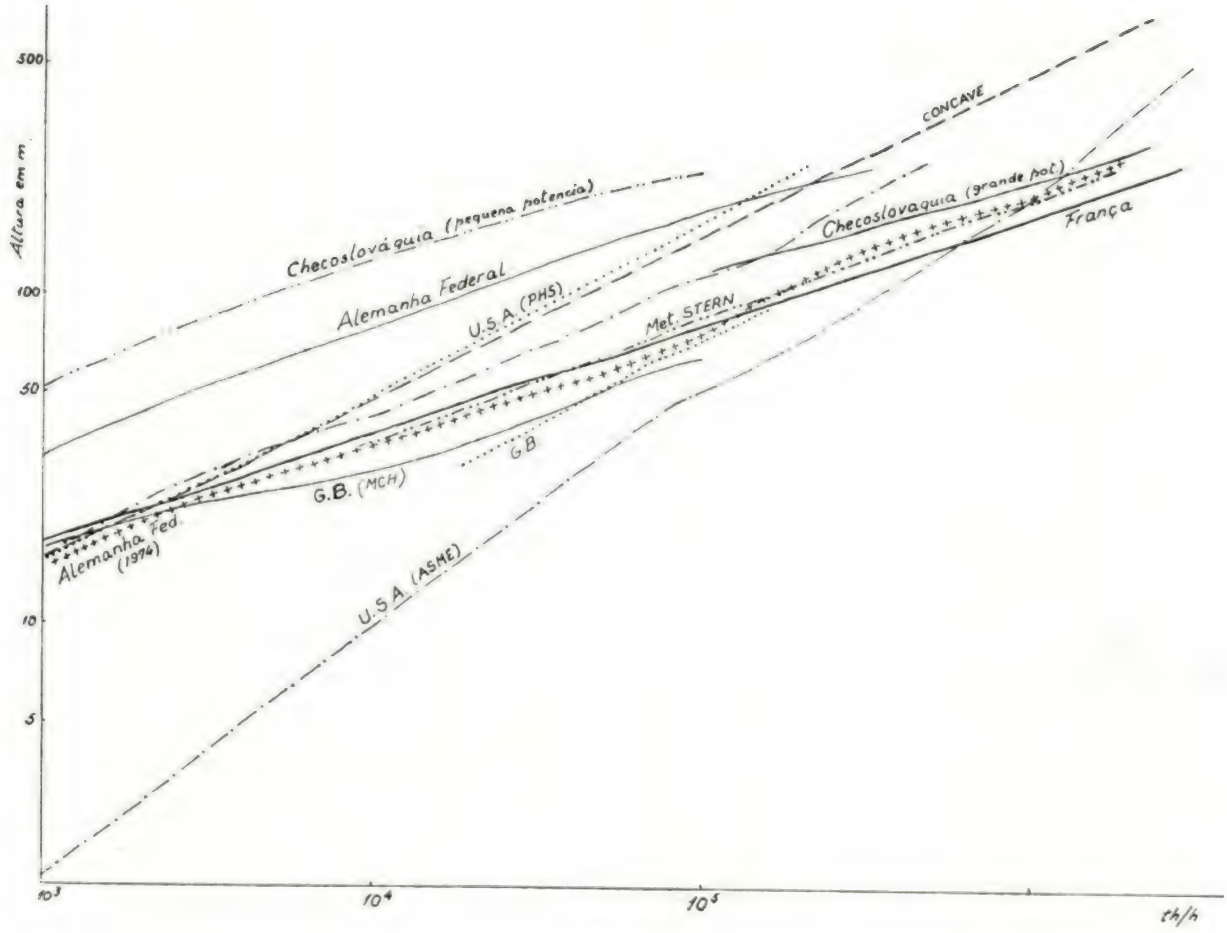


Fig. 4

Comparação dos regulamentos de alturas de chaminé

do VDI para um tempo de amostragem de 1 dia. A altura de chaminé é mais baixa e o teor de S a admitir no fuel-oil bastante mais elevado.

Por outro lado foi consultada pelo GAS uma empresa estrangeira que, utilizando os mesmos dados de projecto, o modelo de Sutton, a fórmula de Briggs e atmosfera neutra, obteve resultados semelhantes ao 2.° estudo.

As condições e resultados dos 3 estudos encontram-se condensados no Quadro I.

4. CONCLUSÕES E CRITICA

Os pontos críticos do dimensionamento duma chaminé emissora de poluentes são os seguintes:

1. Estabelecimento das concentrações máximas de poluente a admitir no solo — CMS — juntamente com o tempo de amostragem e probabilidade de ocorrência.
2. Escolha das condições meteorológicas críticas
3. Cálculo da sobreelevação da pluma

Como é exemplificado nos cálculos efectuados para o dimensionamento da chaminé da Petrosul, uma alteração aparentemente pequena nos dados pode conduzir a variações muito importantes nos resultados.

Observando o Quadro I verifica-se que com o mesmo modelo (Pasquill-Gifford) se obtêm resultados bastante diferentes variando um pouco a duração do tempo de amostragem da CMS e a estabilidade da atmosfera. Deste modo, mantendo-se a CMS de SO_2 pode-se quadruplicar a emissão de poluente desde que se considere que a estabilidade aerodinâmica crítica da atmosfera é representada pela classe B de Pasquill (atmosfera ligeiramente instável) em vez da classe A (estremamente instável) e que o tempo de amostragem considerado aumenta a de 1 hora para 1 dia. A alteração geométrica da chaminé no 2.° caso é ligeiramente inferior à do 1.° caso (296 m em vez de 300 m).

É necessário não esquecer que um erro relativamente pequeno no valor de Δh tem repercuções importantes no preço da construção da chaminé, sobretudo se esta for muito alta. No caso de uma altura efectiva de 400 m se a sobreelevação for 200 m, a altura geométrica será 200 m. Se o valor calculado de Δh for afectado de um erro de — 10 %; este erro traduz-se num aumento de 20 m na altura

QUADRO I

	DADOS				RESULTADOS		
	MODELO	Δh	Classe estab. atmosfera	CMS ($\mu g/m^3$)	h_c (m)	% S max	Emissão SO_2 (t/dia)
1	Pasquill-Gifford	Stümke	extremamente instável	250/hora	300	0.75	33.2
2	Pasquill-Gifford	Stümke	moderadamente instável	250/dia	296	3.5	130.6
3	Sutton com coef. de Catchpole	Briggs	neutra	20/dia (1)	233	3.5	130.6

(1) No estudo 3. foi fixada não a concentração média mas a concentração máxima normal correspondendo a 98 % de probabilidade de ocorrência.

da chaminé, o que, neste caso causará um aumento apreciável do custo da construção.

Finalmente queríamos acentuar o carácter aproximado dos modelos gaussianos de dispersão turbulenta dos poluentes na atmosfera e a forte componente empírica presente nos vários passos do cálculo da altura da chaminé. Com efeito, a determinação dos parâmetros de difusão (σ_y, σ_z ou C_y, C_z, n) é experimental assim como a determinação das constantes da tabela do VDI que convertem a concentração observada para tempos de amostragem diferentes — e as constantes de Catchpole que relacionam estatisticamente as concentrações calculadas pelo modelo de Sutton com as observadas para diferentes tempos de amostragem e probabilidades de ocorrência diferentes.

Cabe agora salientar que «...poderá sempre objectar-se que há factores de incerteza no cálculo que reduzem a validade das conclusões obtidas. A observação é certamente legítima e permite acentuar que um método de cálculo para alturas de chaminés deve considerar-se como de valor indicativo. A verificação «in loco» de que as concentrações serão excedidas deve obrigar a actuar a entidade oficial competente para as fazer desaparecer. A demonstração de que os limites admissíveis nunca serão alcançados deverá permitir de igual modo a redução das imposições legais». *In* Domingos (1973).

BIBLIOGRAFIA

A. S. M. E. (1968) — Recommended guide for the prediction of the dispersion of airborne effluents.

Briggs, G. A. (1969) — Plume Rise — A. E. C. Critical Review Series. U. S. Atomic Energy Commission.

Catchpole, S. (1968) — The Control of Power Station Emissions — given at a Symposium of the Institute of Mechanical Engineers, Oct. 1968.

C. I. T. E. P.A. (1968) — Documento .nº 37.

Détrie, J. P. (1969) — La Pollution Atmosphérique — Dunod Paris — p. 262.

Domingos, J. J. D. e Filipe, J. M. C. (1972) — A General Computer Program for Coupled sets of Quasilinear Parabolic Equations in Three Independent Variables. DTA Report RC/13.

Domingos, J. J. D. (1973) — Bases para um Regulamento de Chaminés de Instalações de Combustão. DTA Report RC/33.

Fisher, B. E. A. (1975) — The Long Range Transport of Sulphur Dioxide. Atm. Env., *9*, p. 1063-1070.

Gifford, F. A. Jr. (1961) — Use of Routine Meteorological Observations for Estimating Atmospheric Dispersion. Nucl. Safety, *2* (4) — p. 47-51.

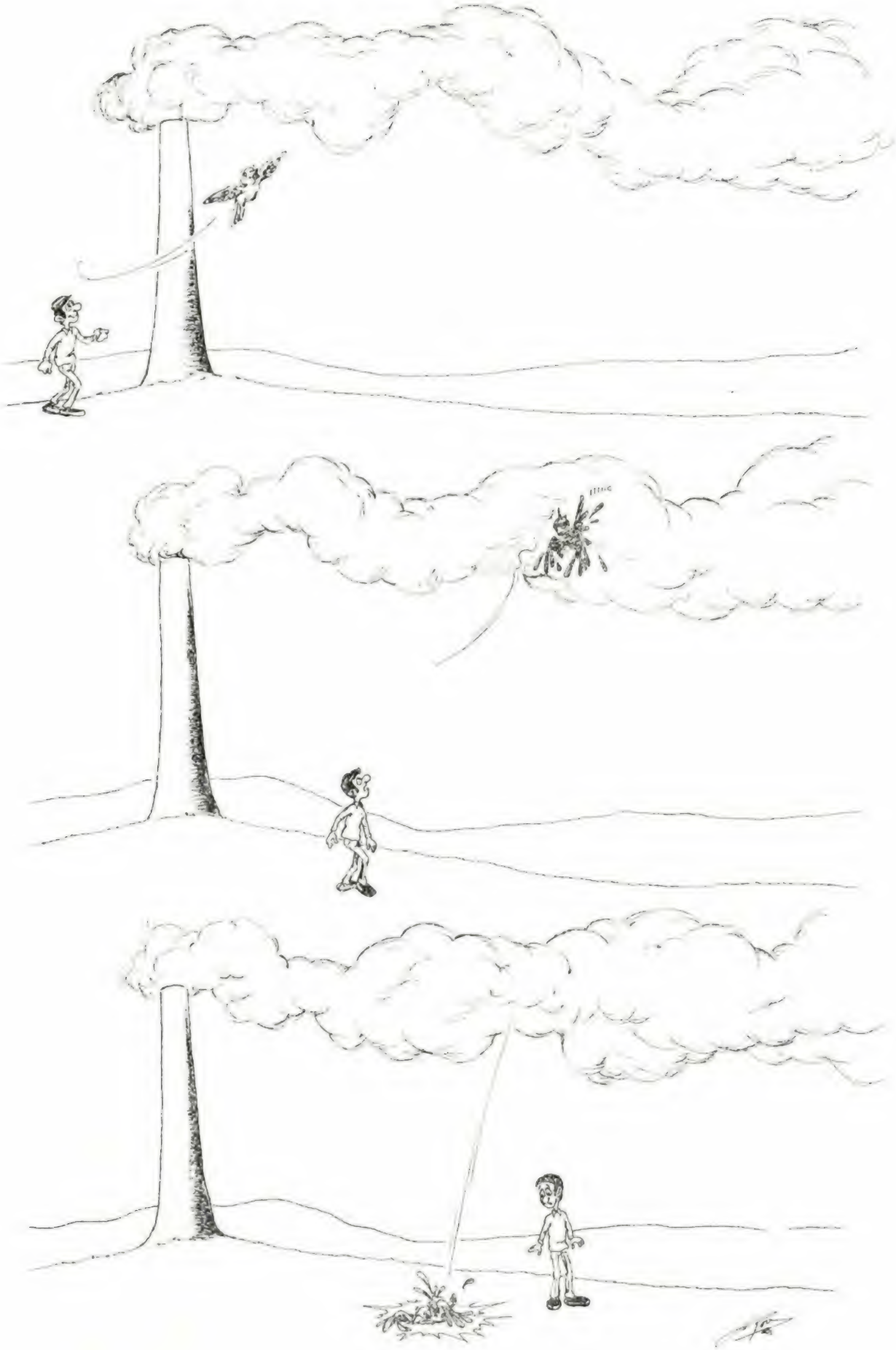
Pasquill, F. (1961) — The Estimation of Windborne Material. Meteorol. Mag., *90* (1063), p. 33-49.

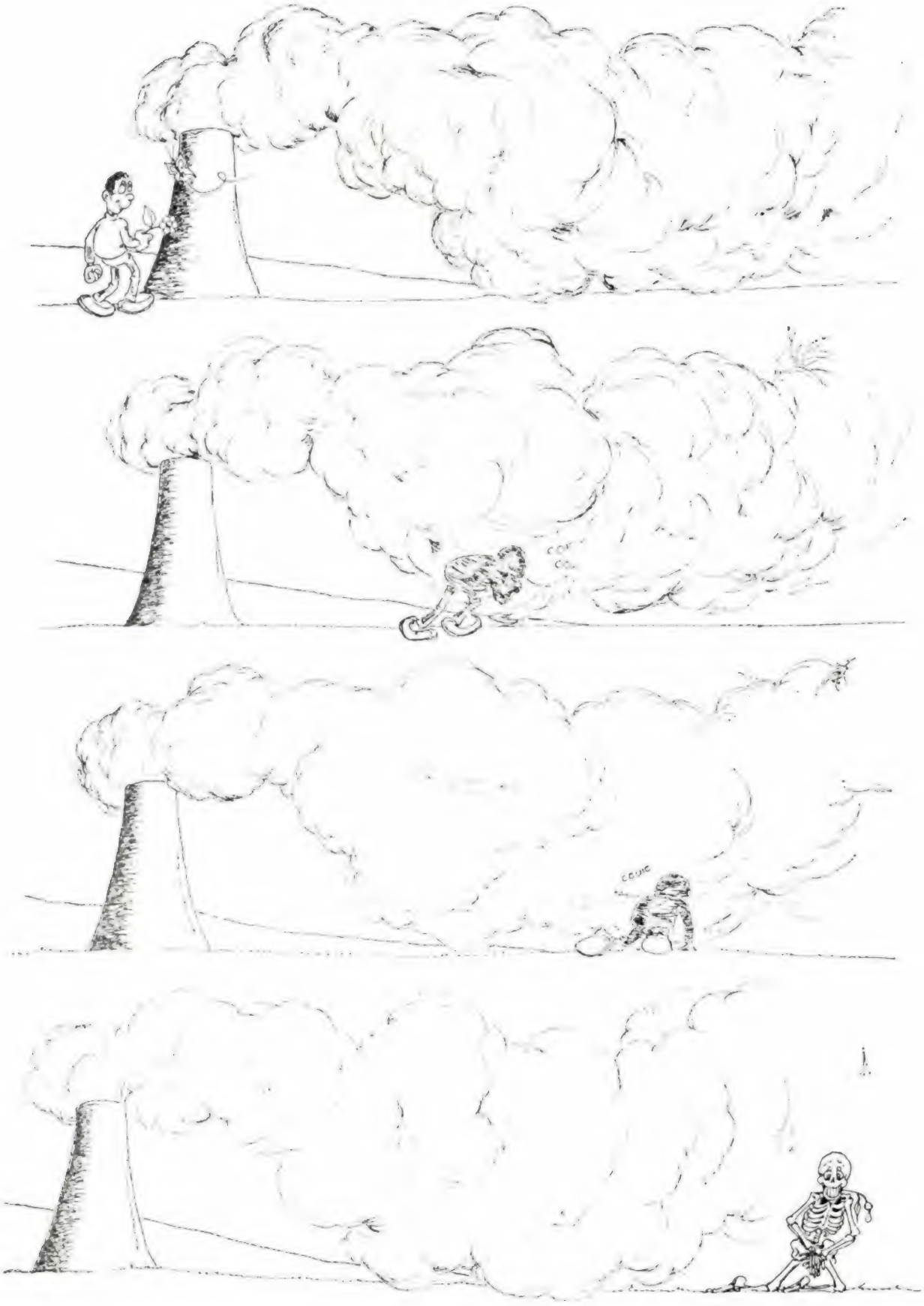
Santos, J. J. A. dos, e Filipe, J. M. C. (1972) — Guia de Utilizador para o Programa EPA3012 — DTA Report RC/14.

Slade, D. H. (ed.) (1968) — Meteorology and Atomic Energy — U. S. Atomic Energy Commission.

Sutton, O. G. (1947) — The Problem of Diffusion in the Lower Atmosphere. Q. Journal of Royal Met. Soc., *73*, n.º 317-318, p. 257-281.

Turner, D. B. (1970) — Workbook of Atmospheric Dispersion Estimates. U. S. Dept. of Health, Education and Welfare. Cincinnati, Ohio.




COUIC

NÚMERO 437 DEZEMBRO DE 1976 ANO LI VOLUME XXXVIII

C. D. U. 536.2:66.046.3:664.8.037:621.58:336.24

Simulação numérica da congelação de peixe por circulação forçada de ar

J. M. BRISSON LOPES [1]

RESUMO

Resolve-se um problema bidimensional de congelação de peixe por meio dum programa de cálculo numérico que permite obter a solução dum sistema de equações às derivadas parciais do tipo:

$$\frac{\delta u_i}{\delta t} = f_{11} \frac{\delta^2 u_i}{\delta x^2} + f_{12} \frac{\delta^2 u_i}{\delta y^2} + f_{13}$$

com condições fronteiras do tipo

$$\beta \frac{\delta u_i}{\delta n} + \gamma (u_i)_s + \delta = o$$

pelo método ADI.

Nesta resolução toma-se em conta que a congelação não se verifica a uma dada temperatura, mas sim numa determinada gama de temperaturas e que é desigualmente distribuída, conduzindo a um problema com propriedades físicas variando discretamente. O programa utilizado pode ser obtido no CTAMFUL, Av. Rovisco Pais, Lisboa-1. Apresentam-se também gráficos com a distribuição das isotérmicas que evidenciam o avanço da frente de congelação ao longo do tempo.

ABSTRACT

This paper describes the numerical solution of a fish freezing process by means of a computer program which solves sets of coupled equations of the kind:

$$\frac{\delta u_i}{\delta t} = f_{11} \frac{\delta^2 u_i}{\delta x^2} + f_{12} \frac{\delta^2 u_i}{\delta y^2} + f_{13}$$

with bondary conditions obeying to:

$$\beta \frac{\delta u_i}{\delta n} + \gamma (u_i)_s + \delta = o$$

applying an ADI method. It was assumed that freezing occurs in an interval of temperature, the rate of freezing varying throughout this interval of temperatures, as it would happen when freezing sea water. The result is a problem with discrete variation of physical properties which is solved for an exemple of fish freezing by forced air convection. The computer program is available from CTAMFUL, Av. Rovisco Pais, Lisboa-1.

The results are also presented in graphics showing how the freezing front and the isothermal lines progress throughout the freezing process.

1. INTRODUÇÃO

O presente trabalho é fruto duma solicitação da indústria à Universidade para resolução dum problema concreto dentro do espírito de cooperação e entendimento que se vai consolidando. Neste caso foi contactada a Linha de Frio Industrial do CTAMFUL com vista ao estudo da congelação de peixe em blocos num túnel de congelação por circulação forçada de ar. Este trabalho constitui a fase inicial de um estudo mais completo o qual inclui a realização de testes num túnel de congelação industrial. A finalidade do estudo é a obtenção de resultados que proporcionem aos projectistas bases para melhor compreensão e cálculo das instalações de congelação deste tipo.

Com vista à realização dos testes antes mencionados foi realizada em computador uma simulação numérica do processo de congelação de peixe em blocos utilizando um programa de uso geral desenvolvido no CTAMFUL. Este relatório pode pois também ser

[1] Assistente eventual do I. S. T., Lisboa.
Investigador do Instituto Nacional de Investigação Científica (C. T. A. M. F. U. L.).

considerado como exemplo duma aplicação a problemas concretos de programas de cálculo numérico anteriormente desenvolvidos pela Linha de Métodos de Cálculo Numérico em Transferência de Energia e Matéria do CTAMFUL. A existência de tais programas gerais torna relativamente expedita a sua aplicação a casos particulares, sendo este o motivo por que o estudo preliminar do problema se iniciou pela simulação numérica do processo.

O objectivo do trabalho é obter dados concretos sobre a duração do tempo de congelação, velocidade de congelação e propagação das isotérmicas com vista à estimativa das necessidades posteriores de instrumentação dos testes em túnel.

2 GENERALIDADES SOBRE O PROBLEMA

Para a congelação em blocos o peixe é disposto em tabuleiros rectangulares de pequena altura que são colocados em estantes de vários andares sendo estas posteriormente colocadas no túnel de congelação.

A simulação foi efectuada para um tabuleiro de tipo análogo aos utilizados nos túneis de congelação. Tais tabuleiros são construídos em alumínio com as dimensões interiores de 480×252×60 mm. Tratando-se de paredes de alumínio, a resistência térmica da parede dos tabuleiros é desprezável face às restantes. Por outro lado, sendo o peixe disposto duma forma compacta admitiu-se que o mesmo forma um bloco homogéneo. Com as hipóteses anteriores o problema reduz-se a um problema de condução de calor em regime variável e propriedades físicas variáveis. O problema é tridimensional. Todavia a sua bidimensionalização é admissível se tomarmos em conta as dimensões e orientação dum tabuleiro face à corrente de ar frio, tal como a fig. 1 apresenta.

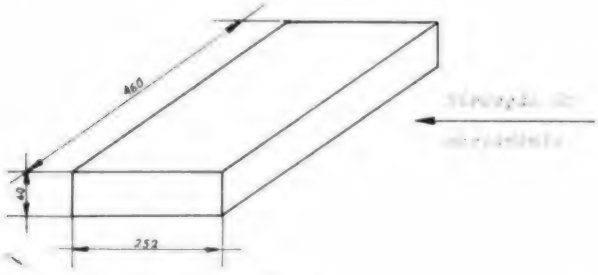


Fig. 1

Como o arrefecimento até ao centro do bloco é muito mais rápido segundo as direcções da altura e largura do bloco pode-se desprezar a contribuição do arrefecimento segundo a direcção do comprimento, com o que o problema se reduz a duas dimensões.

Consideremos agora um elemento de volume infinitamente pequeno. Em corpos que sofrem mudanças de fase é corrente supor que existem fontes de calor nos volumes elementares em que foi atingida a temperatura de mudança de fase considerando-se que a quantidade de energia libertada sob a forma de calor é o calor latente de mudança de fase correspondente ao volume elementar considerado. Este pressuposto é válido para os casos em que a mudança de fase se processa a uma temperatura fixa como é o caso de corpos simples. No caso da congelação de peixe, tal já não é admissível pois trata-se da congelação de uma solução (água + sais). A solidificação da solução dá-se então numa gama de temperatura a qual está normalmente compreendida entre aproximadamente — 1°C (este valor depende da concentração de cloreto de sódio) e — 21,2° C (ponto eutético da solução de cloreto de sódio em água). Do facto resultam duas consequências importantes.

A primeira é que abaixo da temperatura do ponto eutético é impossível congelar mais água e um abaixamento subsquente da temperatura da solução de cloreto de sódio dar-se-á a concentração constante cujo valor depende da concentração inicial da solução. Assim, a congelação considera-se completada quando a temperatura média do peixe é de — 21,2° C. Como do processo de congelação (por considerações de transmissão de calor em regime variável) resulta que a zona exterior do peixe se encontre sempre bastante mais fria que a interior (espinha) surgiu o critério prático que considera a congelação terminada quando se atinge — 18°C na espinha (centro do peixe) e que a uniformização de temperatura posterior conduzirá a um valor próximo de — 21,2°C.

A segunda consequência é importante para o cálculo numérico: como a água contida num dado elemento de volume não congela totalmente à mesma temperatura, não se poderá supor que as propriedades físicas se mantêm constantes até ao momento da congelação e durante o arrefecimento subsequente a esta.

Também não é possível distribuir o calor latente de solidificação de maneira uniforme por uma maior ou menor gama de temperaturas. A sua distribuição dependerá sim da taxa de formação de gelo que é função da concentração inicial da solução e do andamento da linha líquida no diagrama de fases da solução. Assim as propriedades físicas neste intervalo de temperatura são função da quantidade de gelo formado e da respectiva taxa de formação. Este problema será retomado na secção 4.

Outra hipótese deste trabalho diz respeito à difusão da solução através dos tecidos devido a diferenças de pressão osmótica. Observações realizadas por Plank (ver [6]) mostram que o fenómeno é negligenciável desde que a velocidade de avanço da frente de congelação seja suficientemente rápida. Esta hipótese será adoptada neste trabalho preliminar.

3 PREPARAÇÃO DA SOLUÇÃO NUMÉRICA (ADIMENSIONALIZAÇÃO)

3 1 — Equação da difusão do calor

O programa utilizado [1] resolve numericamente sistemas de equações parabólicas não lineares em três

variáveis independentes, sendo uma delas o tempo. As equações assim resolúveis são forma geral

$$\frac{\delta u_i}{\delta t} = f_{i1} \frac{\delta^2 u_i}{\delta x^2} + f_{i2} \frac{\delta^2 u_i}{\delta y^2} + f_{i3} \qquad (1)$$

em que

$$f_{ij} = f_{ij}\left(x, y, t, u_i, \frac{\delta u_k}{\delta \alpha} \right)$$

com $\alpha \in \{x, y\}$ e $i = 1, \ldots, n$
$j = 1, 2, 3$
$k = 1, \ldots, n$

admitindo condições fronteiras do tipo

$$\beta \frac{\delta u_i}{\delta n} + \gamma (u_i)_s = o \qquad (2)$$

sendo β, γ e δ funções de x, y e t.

As equações devem ser previamente adimensionalizadas. Para tal escolheram-se as variáveis adimensionalizadas seguintes

— espaço $\quad x^* = \frac{x}{l} \quad$ e $\quad y^* = \frac{y}{l}$

— tempo $\quad \tau = \frac{t\alpha_0}{l^2}$

A equação da difusão do calor em coordenadas cartesianas a duas dimensões espaciais e na ausência de fontes de calor toma a forma

$$\rho C \frac{\delta T}{\delta t} = \frac{\delta}{\delta x}\left(K \frac{\delta T}{\delta x} \right) + \frac{\delta}{\delta y}\left(K \frac{\delta T}{\delta y} \right) \qquad (3)$$

Quando as propriedades físicas são variáveis (ver [3]) a forma da equação que nos interessa é

$$\rho C \frac{\delta T}{\delta t} = K \left(\frac{\delta^2 T}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 T}{\delta y^2} \right) + \frac{\delta K}{\delta T} \left[\left(\frac{\delta T}{\delta x} \right)^2 + \left(\frac{\delta T}{\delta y} \right)^2 \right] \qquad (4)$$

É conhecido que a adimensionalização nos conduz aos seguintes resultados

— espaço $\quad \frac{\delta T}{\delta x_i} = \frac{1}{l} \frac{\delta T}{\delta x_i^*} \quad$ e $\quad \frac{\delta^2 T}{\delta x_i^2} = \frac{1}{l^2} \frac{\delta^2 T}{\delta x_i^{*2}}$

— tempo $\quad \frac{\delta T}{\delta t} = \frac{\alpha_0}{l^2} \frac{\delta T}{\delta \tau}$

pelo que (4) será

$$\rho C \alpha_0 \frac{\delta T}{\delta \tau} = K \nabla^{*2} T + \frac{dK}{dT} \left[\left(\frac{\delta T}{\delta x^*} \right)^2 + \left(\frac{\delta T}{\delta y^*} \right)^2 \right]$$

ou sob uma forma de acordo com a expressão geral (1)

$$\frac{\delta T}{\delta \tau} = \frac{\alpha}{\alpha_0} \frac{\delta^2 T}{\delta x^{*2}} + \frac{\alpha}{\alpha_0} \frac{\delta^2 T}{\delta y^{*2}} + \frac{\alpha}{\alpha_0} \frac{1}{K} \frac{dK}{dT} \times \left[\left(\frac{\delta T}{\delta x^*} \right)^2 + \left(\frac{\delta T}{\delta y^*} \right)^2 \right] \qquad (5)$$

O cálculo das derivadas de 1.ª ordem não causa transtorno especial pois o programa tem subrotinas para tal efeito.

O cálculo dos valores da difusibilidade e da condutibilidade térmicas será devidamente considerado na secção 4.

3.2 — Condições aos limites

Não nos deteremos sobre a condição inicial (temperatura no início do arrefecimento) pois é simples informar o programa a seu respeito. Uma subrotina especial lê a distribuição inicial de temperatura pelos pontos da malha rectangular aqui considerada. Esta distribuição é uniforme no nosso caso mas o programa admite qualquer distribuição inicial de temperatura.

Para melhor compreensão das condições fronteiras detenhamo-nos na fig. 2 que representa uma faixa dum tabuleiro na direcção do escoamento de ar à qual se sobrepôs um sistema de eixos

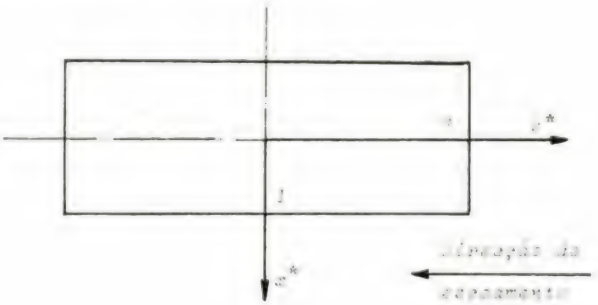


Fig. 2

É evidente que se as condições fronteiras forem do mesmo tipo em todos os pontos da fronteira é possível, devido à simetria, separar cada um das quatro partes.

Assim teremos as seguintes condições fronteiras

— fluxo nulo para $\quad x^* = o$ ou $y^* = o$
ou seja $\quad \beta = \gamma = \delta = o$ em (2)
— fluxo imposto para $\quad x^* = 1$ ou $y^* = a$

o que implica que

$$-K \frac{\delta T}{\delta n} = h \left[(T)_s - T_a \right] \qquad (6)$$

que é uma condição de acordo com (2). Para que se mantenha a semelhança térmica entre o fenómeno real e o modelo adimensional há que fazer com que $Nu = Nu^*$ o que nos impõe que se defina um coeficiente adimensional h^* tal que

$$h^* = h\ l$$

adimensionalizando também em relação à normal, será

$$-K \frac{\delta T}{\delta n^*} = h^* [(T)_s - T_a]$$

ou seja

$$K \frac{\delta T}{\delta n^*} + h^* (T)_s - h^* T_a = 0$$

ou ainda $\beta = K$
$\gamma = h^*$
$\delta = -h^*\ Ta$

Está pois definido o problema. Resta agora calcular as propriedades físicas, o que faremos seguidamente.

4. PROPRIEDADES FÍSICAS

Pelo que já foi dito, as propriedades físicas do peixe estão condicionadas pela quantidade de gelo formado. É este o primeiro problema a ser tratado visto que dele depende a determinação de todas as propriedades físicas a partir do início da congelação.

4.1 — Gelo formado e sua taxa de formação

A quantidade de gelo que se encontra formado a uma dada temperatura compreendida entre 0°C e −21,2°C depende da concentração inicial da solução de cloreto de sódio em água (visto que a influência dos outros sais é desprezável na água do mar) e do andamento num diagrama de fases da linha líquida de tal solução.

A bibliografia consultada sobre este assunto ([2], [4], [5], [6] e [7]) fornece-nos muitos elementos, umas vezes sob a forma de tabelas e gráficos, outras de expressões. Entre as expressões encontradas há uma devido a Riedel que mostrou fornecer valores médios dos elementos confrontados. Essa expressão estabelece uma relação entre a fracção de água que está congelada a uma dada temperatura e essa mesma temperatura, é

$$\omega = \begin{cases} 0 & \text{quando } T \geqslant 272{,}15\ K \\ \dfrac{1{,}105}{1 + \dfrac{0{,}31}{\log(273{,}15 - T)}} & \text{se } 272{,}15K > T > 251{,}95K \\ 0{,}900 & \text{se } T \leqslant 251{,}95\ K \end{cases}$$

A taxa de formação de gelo é então

$$\frac{d\omega}{dT} = \begin{cases} 0 & \text{se } T \geqq 272{,}15K \text{ ou } T \leqq 251{,}95 \\ \dfrac{0{,}34255}{(273{,}15 - T)\ln 10\,[\log(273{,}15 - T) + 0{,}31]^2} & \text{se } 272{,}15K > T > 251{,}95K \end{cases}$$

4.2 — Calor específico

Como o gelo deixa de formar-se a temperatura constante, a equação da difusão do calor não pode ser resolvida com a introdução de fontes de calor a uma dada temperatura correspondente ao ponto de congelação. A equação terá que ter a forma (4) e assim somos levados a definir um calor específico equivalente em que se tenha em conta o gelo formado e a respectiva taxa de formação, o que nos leva a

$$C = C_s(1 - W) + C_a W(1 - \omega) + C_g W \omega - LW \frac{d\omega}{dT}$$

que pode ainda escrever-se sob a forma

$$C = C_s + W\left[C_a - C_s - L\frac{d\omega}{dT} + \omega\left(C_g - C_a\right)\right]$$

onde a formação de gelo é responsável pelo termo

$$-LW\frac{d\omega}{dT}$$

4.3 — Condutibilidade térmica

A condutibilidade térmica terá uma expressão que também resulta da ponderação das propriedades

$$K = K_s\ (1 - W) + K_a\ W\ (1 - \omega) + K_g\ W\ \omega$$

ou

$$K = K_s + W\ [K_a - K_s + \omega\ (K_g - K_a)]$$

donde resulta

$$\frac{dK}{dT} = W(K_g - K_a)\frac{d\omega}{dT}$$

4.4 — Valores numéricos adoptados

Para a simulação numérica que realizámos escolhemos um modelo formado por peixe gordo tal que:

$W = 0{,}6$

$$\rho = 980\ k_g\ m^{-3} = 0{,}98\ g\ cm^{-3}$$

Para as restantes propriedades os valores adoptados foram

$L = 79{,}91$ kcal k_g^{-1} $= 334\,521 \times 10^4$ erg g^{-1}
$C_s = 0{,}440$ kcal k_g^{-1} $K^{-1} = 1{,}8\,414 \times 10^7$ erg g^{-1} K^{-1}
$C_a = 1{,}009$ kcal k_g^{-1} $K^{-1} = 42\,244\,812$ erg g^{-1} K^{-1}
$C_g = 0{,}460$ kcal k_g^{-1} $K^{-1} = 19\,259\,280$ erg g^{-1} K^{-1}
$K_s = 0{,}22$ kcal $h^{-1}m^{-1}K^{-1} = 25\,586$ erg $s^{-1}cm^{-1}$ K^{-1}
$K_a = 0{,}487$ kcal $h^{-1}m^{-1}K^{-1} = 56\,597{,}2$ erg $s^{-1}cm^{-1}$ K^{-1}
$K_g = 1{,}905$ kcal $h^{-1}m^{-1}K^{-1} = 221\,542{,}4$ erg $s^{-1}cm^{-1}$ K^{-1}

5. RESOLUÇÃO NUMÉRICA

5.1 — Condições e adaptação ao modelo

Trata-se dum modelo adimensionalizado constituído por uma malha rectangular igualmente espaçada nas duas direcções do espaço. Segundo uma das direcções, x, o modelo é adimensionalizado à dimensão 1. Como os tabuleiros cuja congelação pretendemos simular têm as dimensões internas $480 \times 251 \times \times 60$ mm, a simulação irá realizar-se para um quarto de secção cujas dimensões são 126×30 mm. Se optarmos por 6 nós segundo x teremos uma distância de 0,2 entre dois nós consecutivos. Assim ter-se-ão 22 nós na direcção y.

A temperatura de evaporação da instalação onde se vão realizar os testes é de —40°C, e existe normalmente uma diferença de temperatura de 5°C entre o ar e o fluido refrigerante. Podemos então supor que a temperatura não perturbada do ar é de —35°C. A temperatura do peixe a congelar à entrada do túnel pode ser suposta uniforme e igual a 15°C.

Para coeficiente de transmissão de calor por convecção (que neste caso é forçada) tomámos um valor aproximado de 22,7 kcal h^{-1} m^{-2} K^{-1} para o seu valor médio. Assim

$$h = 22{,}7\ \text{kcal}\ h^{-1} m^{-2} K^{-1} = 26\,388{,}75\ \text{erg}\ s^{-1}\ cm^{-2}\ K^{-1}$$

5.2 — Resultados

Os resultados que fundamentalmente nos interessavam eram a velocidade de congelação, os tempos de congelação e de refrigeração e a distribuição de temperaturas ao longo do processo.

Assim e dos resultados obtidos que incluiam a distribuição de temperaturas com intervalos de aproximadamente 2 minutos, foi possível obter os seguintes valores

Tempo de congelação (—18°C no centro)
3 h 3 min. 42 s
Tempo de congelação (—21,2°C de média)
2 h 52 min. 25 s
Tempo de refrigeração (—1°C de média)
45 min. 10 s
Início da congelação na menor espessura
4 min. 47 s
Atinge-se —5°C no centro ao fim de
2 h 34 min. 52 s
Velocidade de congelação
1,2 cm/h

Como se vê a velocidade de congelação corresponde à de uma congelação ainda lenta, mas já próxima do limite a partir do qual é considerada rápida, o que nos permite concluir que a hipótese feita sobre a difusão de água foi correcta.

Com base nas distribuições de temperatura que o programa calculou traçaram-se as curvas isotérmicas para instantes com aproximadamente meia hora de intervalo entre si. Esta traçagem foi realizada com um programa traçador de curvas de nível desenvolvido no CTAMFUL para o calculador HP9830A utilizado no CTAMFUL o qual está acoplado a um traçador de gráficos.

Os gráficos obtidos evidenciam bem o avanço da frente de congelação e das isotérmicas e permitem uma boa visão do seu andamento e distribuição.

AGRADECIMENTOS

Queríamos aqui expressar os nossos agradecimentos ao Prof. Delgado Domingos pelas sugestões e críticas formuladas durante a realização deste trabalho.

BIBLIOGRAFIA

1 — *Amarante dos Santos, J. J.; Cruz Filipe, J. M.;* Manual do utilizador do programa EPA-3020 para sistemas de equações parabólicas não lineares em três variáveis independentes, Relatório RC/29, Núcleo de Estudos de Engenharia Mecânica, Instituto de Alta Cultura, Lisboa, 1973.

2 — *American Institute of Physics Handbook,* McGraw-Hill Book Company, Inc., New York, 1957.

3 — *Carslaw, H. S.; Jaeger, J. C.;* Conduction of Heat in Solids, 2nd. edition, Oxford University Press, Oxford, 1959.

4 — *Göttsche, G.; Pohlmann, W.;* Formulaire du frigoriste, Trad. francesa da 12.ª edição, Dunod, Paris, 1956.

5 — *Mörsel, H.;* Vademecum del frigorista, edição em castelhano, Editorial Acribia, Zaragoza, Título original «Taschenbuch Kälteanlagen», VEB (Verlag Technik, Berlin), Berlin, 1967.

6 — *Plank;* El frio en la industria de la alimentation, ed. em castelhano.

7 — *Zaitsev, V. P.;* Preservation of fish products by refrigeration, trans. from Russion, U. S. Dept. of Commerce, Clearing House for Federal Scientific and Technical Information, Springfield, 1965.

SIMBOLOGIA

Letras

C — Calor específico
C_a — Calor específico da água
C_g — Calor específico do gelo
C_s — Calor específico dos tecidos secos do peixe
h — Coeficiente de transmissão de calor por convenção
K — Condutibilidade térmica
K_a — Condutibilidade térmica do gelo
K_s — Condutibilidade térmica dos tecidos secos do peixe
L — Calor latente de fusão da água
l — Dimensão característica do modelo real, factor de escala
n — Normal à fronteira do sistema dirigido para o exterior
Nu — Número de Nusselt
T — Temperatura absoluta
t — Tempo real
T_a — Temperatura não perturbada do fluido circulante (ar)
T_0 — Temperatura inicial do peixe
u_i — Variável genérica da equação diferencial i
x — Variável espacial
y — Variável espacial
W — Fracção de água na massa total do peixe

Letras gregas

α — Difusibilidade térmica
α_0 — Difusibilidade térmica inicial
ρ — Massa específica do peixe
τ — Tempo adimensional
ω — Fracção de água congelada a uma dada temperatura

Índice superior

* — Variável adimensionalizada

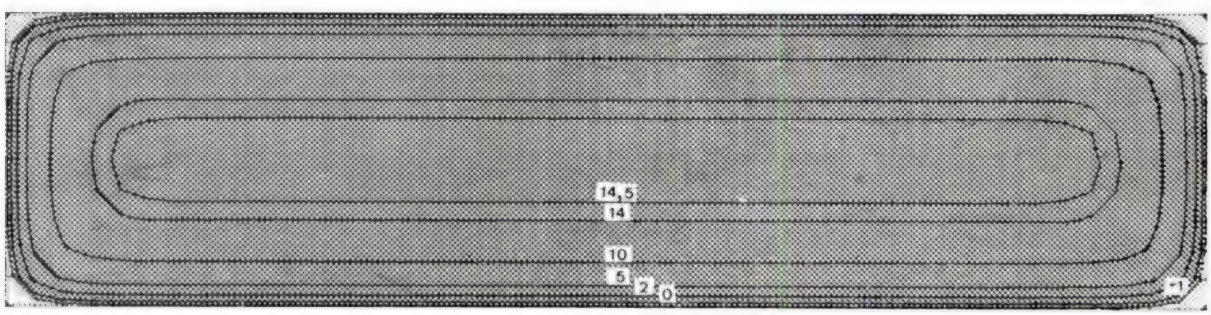


Fig. 3
Isotérmicas às 0 h 6 min. 9,5 s

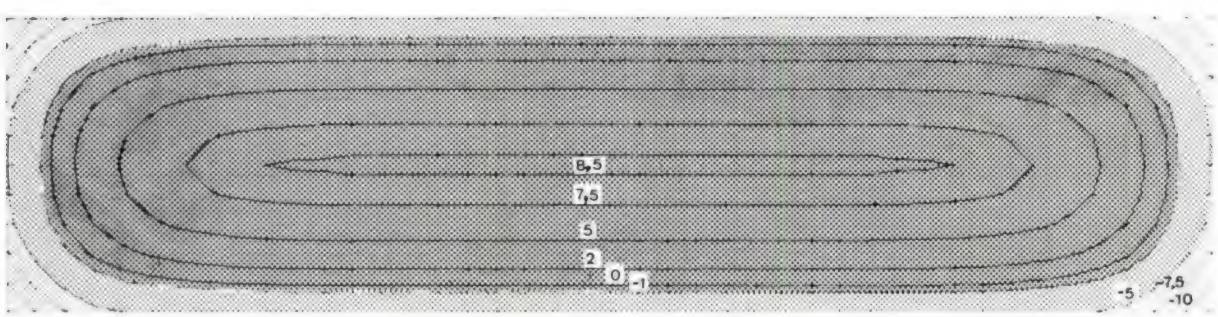


Fig. 4
Isotérmicas às 0 h 30 min. 47,5 s

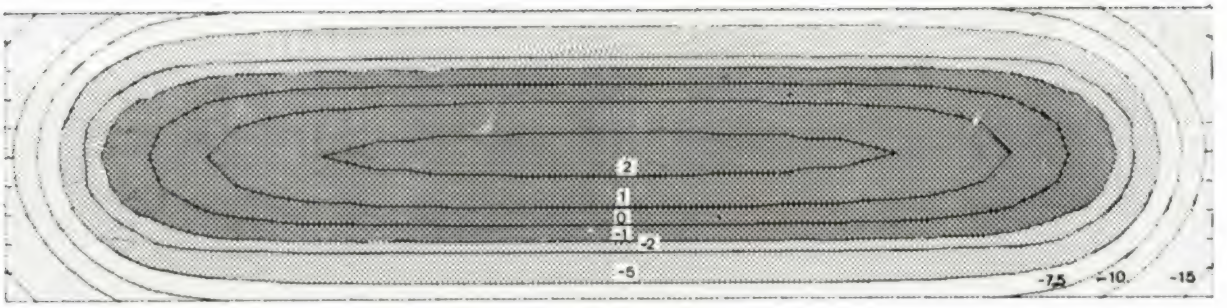


Fig. 5

Isotérmicas às 0 h 59 min. 31,9 s

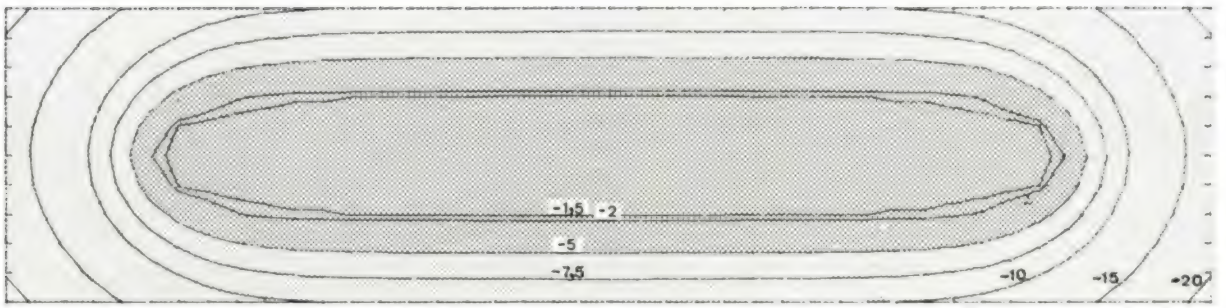


Fig. 6

Isotérmicas à 1 h 30 min. 19,4 s

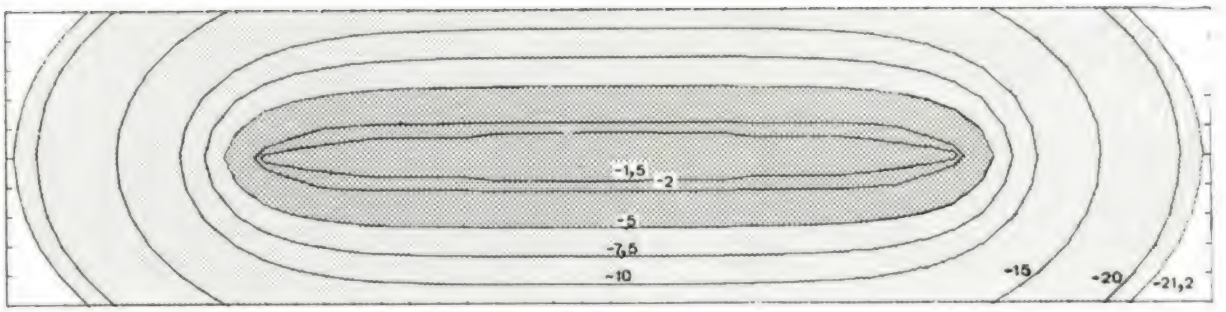


Fig. 7

Isotérmicas à 1 h 59 min. 3,6 s

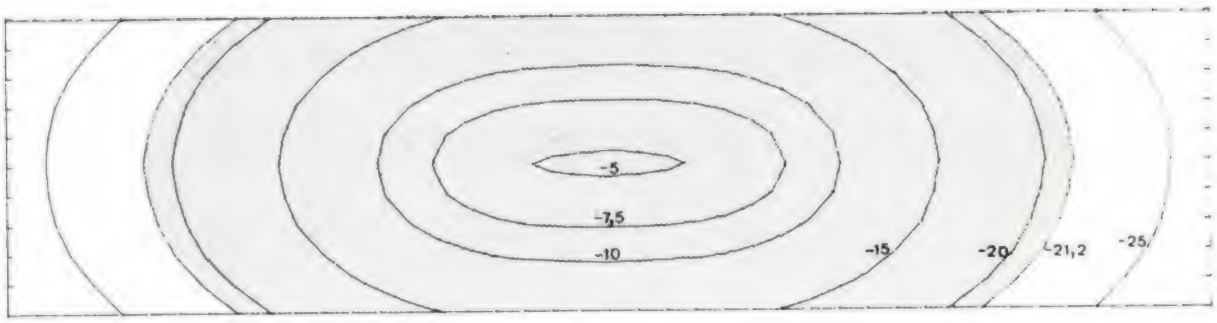


Fig. 8
Isotérmicas às 2 h 36 min. 0,2 s

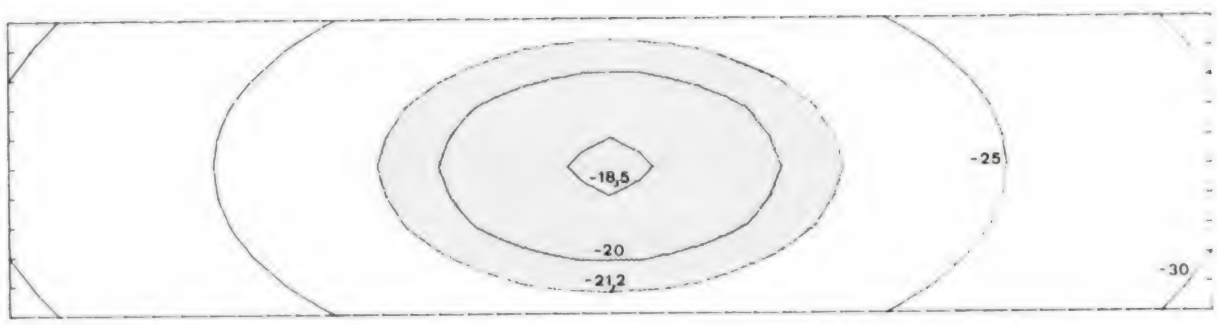
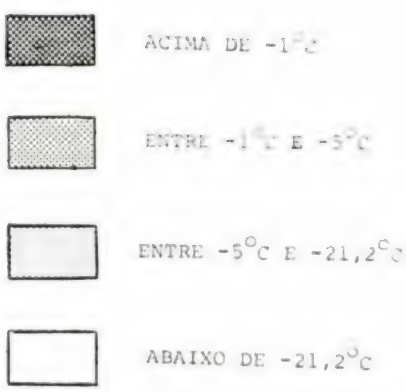


Fig. 9
Isotérmicas às 3 h 4 min. 44,2 s



C. D. U. 621.47:621.383

As células fotovoltaicas no aproveitamento da energia solar

LEOPOLDO J. M. GUIMARÃES (1)

RESUMO

A energia solar representa uma solução que se considera possível para resolver em parte o grave problema de encontrar partes de energia que possam substituir em termos de futuro as disponibilidades energéticas clássicas que num futuro mais ou menos próximo se encontrarão esgotadas.

Neste artigo tecem-se algumas considerações acerca do aproveitamento da energia solar, usando células solares as quais convertem a radiação solar directamente em energia eléctrica com uma razoável eficiência.

SUMMARY

Solar energy represents one possible solution to the major problem we face today: how to find energy resources to replace the non-renewable energy reserves we have been using and wasting up to now.

In this paper some considerations are made on solar cells which are photovoltaic cells that convert sunlight directly into electrical energy with a good efficiency.

1. INTRODUÇÃO

Tomando como factor reconhecido a importância que obrigatoriamente se tem de dar ao aspecto de encontrar novas formas de energia para assegurar em termos de futuro as disponibilidades de fontes de energia, num planeta como o nosso em que as reservas clássicas são limitadas e as necessidades sempre crescentes, pode e deve por-se a questão de qual o caminho a seguir, quais as formas alternativas de energia a explorar dentro do que se apresenta como possível.

Uma das hipóteses é sem dúvida o aproveitamento da energia solar, dadas as potencialidades que na realidade apresenta, em países como o nosso.

Sem nos debruçarmos muito sobre o pormenor das vantagens do aproveitamento da energia solar, podemos no entanto referir que a quantidade de energia que atinge a superfície da Terra em cada ano é de cerca de 3×10^{24} Joules, número que convém comparar com as actuais reservas orgânicas conhecidas, que se estimam em 1×10^{24} J, com um consumo previsto para o ano 2000, de cerca de 69×10^{10} G Joules. É este o momento do nosso país se debruçar seriamente sobre o problema, pois uma perda de tempo neste campo, traduzir-se-á num irrecuperável atraso relativamente a outros países que preparam já a industrialização da fabricação de centrais solares para exportarem para países considerados subdesenvolvidos, os quais, por sua vez, usufruem normalmente das condições climatéricas mais favoráveis a este tipo de aproveitamento.

A propósito, indicamos a seguir os níveis de investimento de alguns países na investigação e desenvolvimento da energia solar, sob vários aspectos do seu aproveitamento:

	Milhões de $U.S.
Estados Unidos	70
Japão	36
França	6
Alemanha Ocidental	6

2. ALGUMAS CONSIDERAÇÕES SOBRE CÉLULAS SOLARES

A célula solar é uma célula fotovoltaica que converte energia da radiação solar directamente em

(1) Professor Extraordinário da Universidade Nova de Lisboa.
Investigador do Instituto Nacional de Investigação Científica (C. T. A. M. F. U. L.).

energia eléctrica, com uma eficiência que à luz do actual desenvolvimento tecnológico atinge valores não muito superiores a 10%*. A potência eléctrica gerada é aproximadamente proporcional à intensidade da radiação solar e à área útil colectora, não exigindo a conversão qualquer movimento mecânico, nem ciclos termodinâmicos intermédios.

Fabricando-se as células solares a partir de materiais semicondutores, interessa referir alguns aspectos que influenciam a obtenção de resultados de interesse prático.

Duma forma simplista, os materiais semicondutores podem ser classificados a partir da sua largura de banda, parâmetro que permite conhecer o rendimento energético teórico, se forem feitas algumas aproximações. A Fig. 1 resulta dum estudo feito nesta

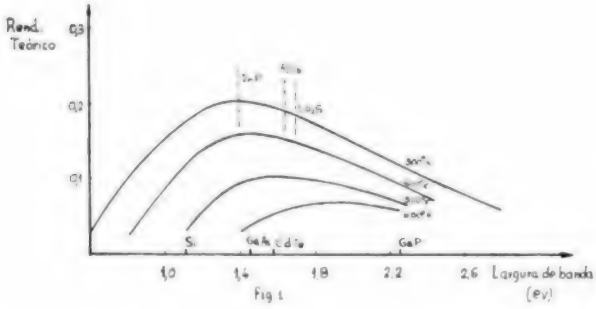


Fig. 1

base, podendo ver-se que certos materiais se encontram junto do máximo da curva de variação.

Os rendimentos obtidos na prática, divergem muitos dos valores teóricos, principalmente por razões tecnológicas. Cite-se o exemplo do GaAs (junção p-n obtida por difusão num monocristal) que apresenta um rendimento de apenas 11%.

Existem de facto vários factores que limitam a eficiência duma célula fotovoltaica. Uns dependem da própria fenomenologia do funcionamento da célula, de modo que pouco se pode esperar no sentido de melhorar os seus efeitos; outros são passíveis de se tornarem sucessivamente menos importantes, à medida que se progride na técnica de fabricação.

De entre os primeiros, podemos destacar:

— Utilização duma parte muito restrita da energia dos fotões incidentes responsáveis pela criação dos pares electrão-lacuna, sendo a energia excedente perdida através do mecanismo de criação de fonões.
— Absorção incompleta da radiação incidente.
— Factor de tensão, dado pela relação entre a tensão do curto-circuito e a diferença de potencial correspondente à descontinuidade energética característica da junção p-n.

De entre os segundos, salientamos:

— Perdas por reflexão óptica na superfície. A minimização deste efeito pode ser conseguida através da aplicação de camadas anti-reflectoras sobre a superfície colectora. Tem-se aliás avançado bastante neste campo, com imediatas repercussões na fabricação de módulos solares que fazem o aproveitamento da energia solar transformando-a em energia térmica.
— Recombinação de pares electrão-lacuna ou seja incompleto aproveitamento de pares que difundindo-se através da junção, não contribuem para o mecanismo de conversão de energia.
— Radiação perdida devido à pequena espessura da parte útil da célula, com consequente absorção da radiação através dos contactos exteriores.
— Degradação das características da junção, devido à resistência interna.

3. MATERIAIS PARA FABRICAÇÃO DE CÉLULAS SOLARES

As primeiras células utilizadas, manufacturaram-se a partir de monocristais de Si e pouco depois a partir de cristais de CdS. Muito embora o Si permita células estáveis com eficiências superiores a 10%, grandes facilidades na obtenção da matéria-prima a par duma tecnologia bastante mais evoluída que a de qualquer outro material, a sua vulnerabilidade à deterioração pela radiação e a exigência de monocristais de elevada pureza, portanto muito caros, fazem com que se dispense uma atenção sempre crescente a outros materiais que apresentam potencialmente melhores condições de utilização. Concretamente não se conseguiu até agora substituir com vantagem global a tecnologia do Silício, mas está naturalmente aceite que os novos materiais apontam como hipóteses promissoras para células solares de segunda geração. Estão neste caso materiais como CdTe, CuS, InP, AsGa que correspondem normalmente a materiais semicondutores caracterizados por terem uma largura de banda que cai entre 1 ev e 1,6 ev. Esta largura de banda, corresponde uma optimização da potência fornecida pela célula, ou seja a um valor máximo do produto tensão disponível pela corrente gerada.

As células solares podem apresentar-se em forma monocristalina ou em forma de películas finas. Muito embora a eficiência destas últimas, seja bastante inferior às primeiras em face do menor tempo de vida dos transportadores minoritários, apresentam no entanto algumas vantagens que as consagram como possíveis soluções para o futuro. Algumas dessas características são as seguintes:

(*) A eficiência teórica máxima que se pode conseguir para uma célula solar fixa-se em 25% em condições de radiação directa da luz solar num material de largura de banda de 1,4 ev.

— maior área da célula
— menor peso
— maior resistência à degradação por efeito de radiação
— menor preço dos conversores, quer para uso terrestre quer espacial.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As células solares tiveram a sua principal aplicação no fornecimento de energia a módulos espaciais, dadas as suas características de reduzido peso, simplicidade, eficiência e facilidade de utilização em qualquer parte do espaço. Note-se, porém, que a curto prazo, se prevê a sua utilização em larga escala em aplicações terrestres, podendo mesmo afirmar-se que a breve trecho, digamos já na década 1980-1990, a associação de todas as formas de aproveitamento de energia solar, poderia cobrir pelo menos 20% das nossas necessidades em energia o que evidentemente torna indispensável conjugar esforços para estabelecer ao nosso nível um programa coerente de investigação. Existem de facto pessoas e grupos a tentar trabalhar neste domínio mas duma forma perfeitamente desgarrada sem uma planificação adequada que permita retirar o melhor rendimento do esforço investido. Naturalmente que esta situação resulta em nossa opinião, da forma lacunar como se tem encarado a investigação aplicada no nosso país, não se estabelecendo as prioridades necessárias por um lado e não se dotando essa mesma investigação das necessárias verbas que constituiriam sem dúvida um investimento que obrigatoriamente produziria a seu tempo os necessários frutos.

NÚMERO 437 DEZEMBRO DE 1976 ANO LI VOLUME XXXVIII

C. D. U. 697.97:662.997

Elaboração de tabelas de temperatura Sol-Ar para paredes, para a região de Portugal Continental

L. F. RORIZ
Assistente do IST
e Investigador do CTAMFUL

SUMÁRIO

De todos os métodos utilizados para o cálculo de cargas térmicas em Ar Condicionado, o da Temperatura Sol-ar é o mais preciso e é largamente utilizado. Por estes motivos e dado que as tabelas existentes não se referem à situação climatológica de Portugal, elaborou o autor, tabelas de temperatura Sol-ar próprias para as características do nosso país.

SUMMARY

The Sol-air temperature method is an accurate and widely used method in Air-Conditoning engineering, for the calculation of heat gains in a room. This work presents tabulated values that are to be used in Portugal, as evaluated tables of Sol-air temperature for this weather conditions are not available.

INTRODUÇÃO

Em qualquer projecto de ar condicionado, um dos mais importantes problemas que se põem na sua resolução é o cálculo das cargas térmicas a que está sujeito o ambiente a climatizar, ou seja a energia que esse espaço está a trocar com o exterior. A sua importância é imediata já que o dimensionamento de toda a aparelhagem é feita com base no valor calculado da carga térmica. Ter-se-á portanto que, se a carga térmica calculada for inferior à que realmente existiria para as condições pretendidas, a instalação terá no final uma potência inferior àquela que é realmente necessária. Por outro lado, se a carga calculada for muito superior à carga real máxima (para as condições pretendidas), embora a instalação possua a potência necessária, a sua zona de funcionamento, muito abaixo da do rendimento óptimo, torna muito difícil ou até impossível um perfeito controlo das condições interiores dentro dos limites pretendidos.

Se, por um lado, um método simples tem a vantagem dum cálculo rápido da carga térmica, a precisão do resultado é muito difícil de prever à priori, já que não se entra em conta com as propriedades dos materiais que constituem a estrutura do espaço a climatizar. Um grande desvio em algumas destas propriedades em relação às que serviram de base às fórmulas empíricas que constituem o algoritmo de cálculo, podem levar a uma das situações acima mencionadas, com o inconveniente de o reconhecimento de tal erro só muitas vezes poder ser detectado depois de montada toda a instalação.

Pelas razões indicadas, dos métodos conhecidos pelo autor, o da temperatura Sol-ar é o mais preciso e portanto o aconselhável, visto ser aquele que entra em linha de conta com o maior número de propriedades dos materiais de construção através dos quais se farão sentir os fenómenos de transmissão de calor. No entanto não é do seu conhecimento que existam tabelas próprias para o clima de Portugal e é no sentido de tabelar os valores da temperatura Sol-ar para as condições do nosso país, que foi desenvolvido este trabalho, tomando como base para os valores da radiação solar, os apresentados por P. Moon em Proposed Standard Solar Radiation Curves for Engineering Use.

MÉTODO DA TEMPERATURA SOL-AR

Para melhor compreender este método, suponhamos a parede P do edifício representado na figura 1. As trocas de calor entre o ambiente (A) e o exterior (E), devem-se essencialmente a um gradiante de temperatura entre o exterior e o interior e à radiação solar que incide na parede.

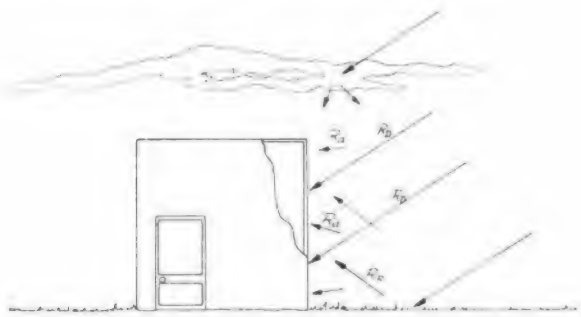


Fig. 1

Esta é composta por:

R_D — Radiação solar directa
R_d — Radiação solar difusa
R_r — Radiação solar reflectida (por objectos próximos)

Supondo o edifício isolado, não existirão portanto corpos próximos e a radiação solar reflectida será proveniente apenas da radiação reflectida pelo solo.

Embora a radiação solar extra-terrestre (radiação solar antes de atingir a atmosfera terrestre) seja praticamente constante, a intensidade dessa radiação ao atingir a superfície da Terra variará com a altura do Sol, já que o caminho percorrido pelos raios solares será tanto menor quanto mais próximo ele estiver do zénite (ver a figura 2).

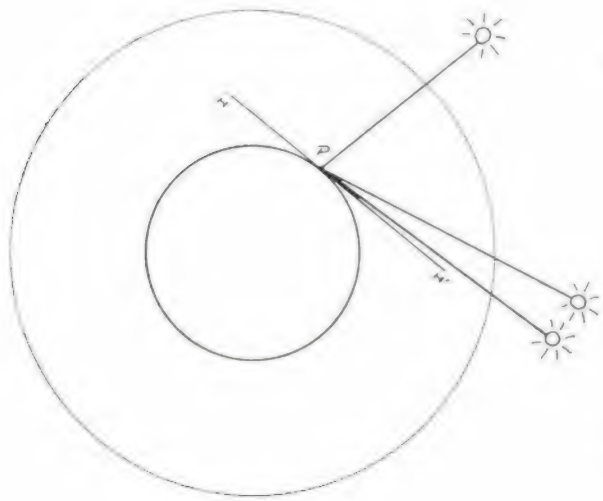


Fig. 2

Desta forma, a absorção de parte da energia solar (pelos gases raros, vapor de água, ozono, etc.) será tanto maior quanto menor for a altura solar. Na figura 3 está representada esta variação da intensidade da radiação solar com a altura solar.

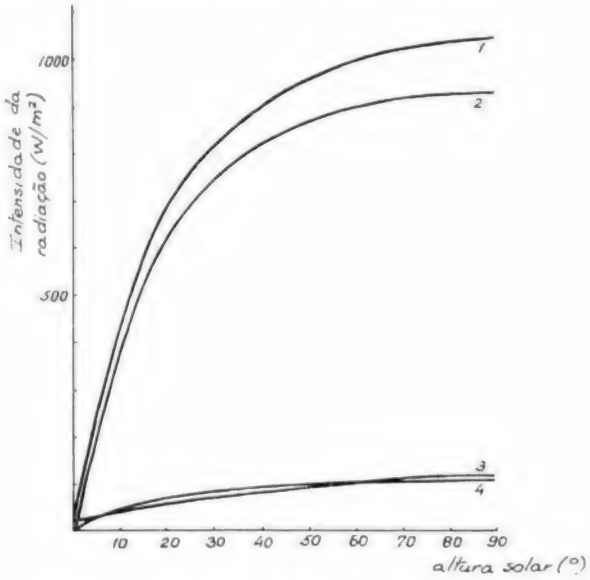


Fig. 3

1 — Radiação solar directa e difusa. 2 — Radiação solar directa. 3 e 4 — Radiação solar difusa. Curvas 1, 2 e 3 de acordo com «Proposed Standar Solar Radiation Curves for Engineering Use».

Curva 4 considerada como sendo igual a 11.5 % da radiação solar directa.

A radiação difusa resulta de parte da energia radiante ser difundida em todas as direcções, ao encontrar moléculas de azoto, oxigénio, vapor de água, poeiras, gotas de água (núvens), etc. Também a sua intensidade varia com a altura solar e a proporção entre ela e a radiação solar total não será constante. No entanto a variação é pequena, como se pode vir na figura 4.

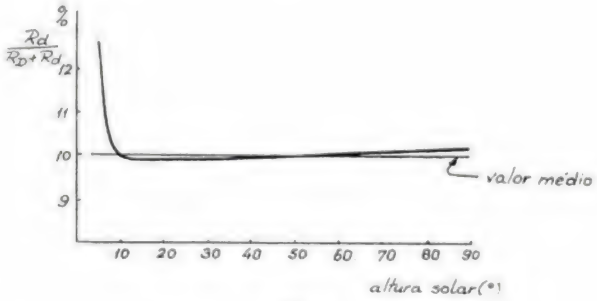


Fig. 4

Em média o seu valor corresponde a aproximadamente 10,0% da radiação solar total (considerando apenas a radiação directa e difusa). Isto corresponde a poder-se considerar que a radiação difusa tem um valor menor ou igual, incidindo numa parede vertical a 5,75% da radiação solar directa ao longo do dia.

Aliás a intensidade da radiação difusa só é superior ao valor apresentado e desde que se admita um erro de 5 % no cálculo do seu valor, para alturas solares inferiores a 7° ou superiores a 76°. De notar que em Portugal a altura solar nunca excede 76.3°, já que a latitude mais baixa do território é cerca de 37.2° e para as zonas do norte, do centro e grande parte do sul do país a altura solar ao longo de todo o ano não excede os referidos 76°. Em relação aos valores de altura solar inferiores a 7° é conveniente referir que essa situação apenas se verifica durante cerca de duas horas ao longo de todo o dia: a primeira até uma hora depois do nascer do Sol, e a segunda uma hora antes do pôr do Sol, e como já foi referido, a estas horas a radiação solar total é bastante pequena.

De salientar também que não existe qualquer problema em considerar para cálculos, um valor da energia recebida pela parede por radiação difusa ligeiramente superior ao valor real pois não se estaria em nenhum dos dois inconveniente apontados no início deste trabalho.

Quanto à radiação incidente no solo que em parte será reflectida, também ela depende da altura solar, já que a intensidade da radiação que incide numa superfície horizontal é tanto maior quanto maior for a altura solar. A radiação reflectida pelo solo que é a parte que nos interessa considerar varia também com o clima da região pois a factor de reflexão dum solo depende, para além do próprio tipo de solo, das condições climatéricas existentes no local.

Convém ainda referir que uma parede por estar a uma dada temperatura, emite, ela também, radiação, mas esta é praticamente compensada pela radiação que essa parede recebe, emitida pelo solo vizinho.

Pelo que foi dito é evidente que um cálculo da carga térmica devida à radiação solar, a partir dos valores da intensidade da radiação solar total e das diferentes orientações que os raios solares vão tendo em relação à parede em estudo, obrigava a cálculos relativamente moroso que não se coadunam com um método de cálculo de cargas térmicas que se pretende tão expedito quanto possível. O método da temperatura Sol-ar cria então um aumento fictício na temperatura do ar exterior e a carga térmica devida à radiação é considerada como uma carga também ela devida a uma diferença de temperatura. A carga térmica através duma parede, devido à radiação e à diferença de temperaturas entre o exterior e o interior será então igual à carga térmica que existiria não havendo radiação solar mas estando o ar exterior a uma temperatura superior à real. Esta temperatura fictícia do ar é a temperatura Sol-ar (T_{sa}).

A diferença entre a temperatura Sol-ar e a temperatura exterior, que é portanto proporcional à carga térmica recebida pela parede por radiação, foi calculada para diversas situações ao longo do dia. São estes diferentes valores e para diferentes meses que serão apresentados neste trabalho.

CÁLCULO DA TEMPERATURA SOL-AR

A intensidade da radiação solar directa que incide numa parede é função da altura solar (α) e

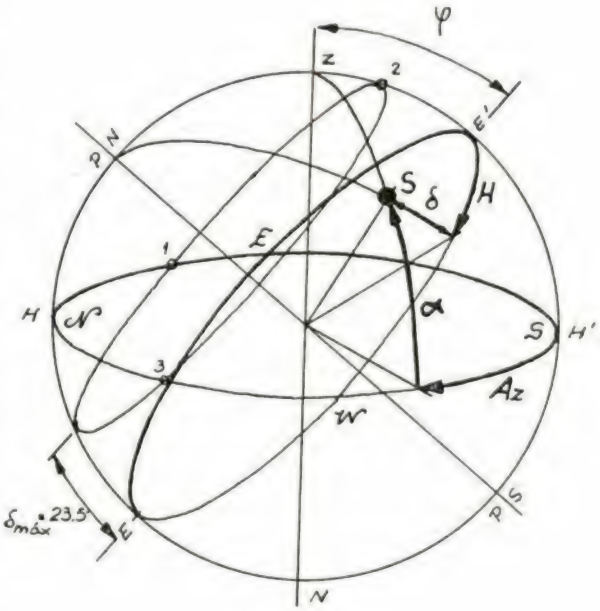


Fig. 5

φ — latitude; δ — declinação; Az — azimute; α — altura solar; H — ângulo horário; PN — Pólo Norte; PS — Pólo Sul; Z — Zénite; N — Nadir; *N* — Norte; *S* — Sul; *E* — Este; *W* — Oeste; HH' — plano do horizonte; EE' — plano do Equador; δ_{max} — declinação solar máxima, correspondente ao solstício de Verão. Para este dia, o Sol nasce no ponto 1, ao meio-dia situa-se na posição 2 e põe-se no ponto 3. Para uma posição qualquer do Sol (S) estão indicadas as principais coordenadas tanto equatoriais como horizontais, e que definem a posição do Sol.

A latitude do território do continente situa-se entre 37.2° e 42°. A declinação solar varia entre 23.5° N (Verão) e 23.5° S (Inverno).

do ângulo azimutal da parede (Azp). O ângulo azimutal da parede é o ângulo formado pelo azimute solar e pela orientação da parede. Por analogia com o sentido seguido para o azimute (ver figura 5) a orientação das paredes far-se-á também no sentido dos ponteiros do relógio e com origem no Norte. Assim, a orientação duma parede norte será 0°, duma parede este 90°, duma parede sul 180°, etc. Utilizando esta forma de proceder, o valor do ângulo azimutal duma parede é obtido directamente por uma subtracção de dois ângulos: azimute solar e orientação da parede.

A partir da figura 6 obtém-se:

$$I_v = I \cos \alpha \cos Azp$$

sendo I_v a intensidade da radiação que incide na parede é I a intensidade da radiação solar.

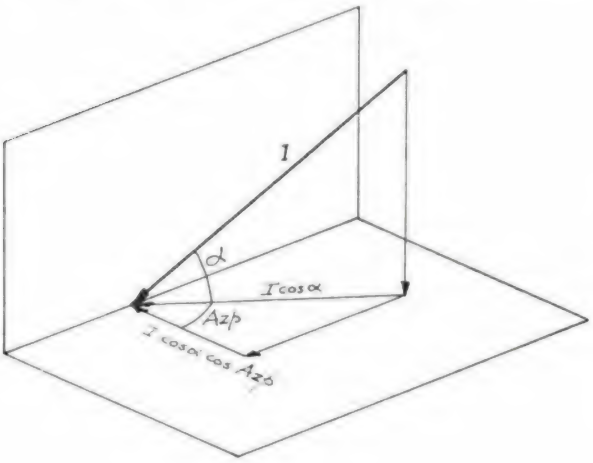


Fig. 6

Uma vez conhecida a radiação recebida pela parede é possível determinar o acréscimo fictício de temperatura T_{sa}.

$$\Delta T_{sa} = T_{sa} - T_e = 1/h_e \ (\alpha I_S - \epsilon I_T)$$

sendo:

ϵ — coeficiente de emissividade da superfície exterior da parede

α — coeficiente de absorção da superfície exterior da parede

h_e — coeficiente de convecção exterior

I_S — radiação recebida pela superfície exterior da parede

I_T — radiação emitida pela superfície exterior da parede

Como já foi referido, pode-se considerar $I_T = 0$.

Para a elaboração das tabelas considerou-se uma velocidade do vento igual a 12 Km/h e que o clima da região é um clima temperado. Estes valores são normais para o Verão na quase totalidade do território continental.

A cor da superfície exterior da parede, para os valores apresentados, é a cor escura. O acréscimo virtual de temperaturas assim calculado, para diferentes alturas solares e ângulos azimutais da parede é apresentado na tabela 1.

Notar que as horas referidas são horas solares. Aliás qualquer referência a uma dada hora será sempre feita em relação à hora solar e não à hora legal.

Se as paredes em estudo tiverem uma cor clara ou média, deve-se aplicar uma correcção aos valores apresentados, multiplicando-os respectivamente por 0.65 ou 0.85. Para os edifícios de cor muito clara usar também o factor de correcção 0.65, já que ao fim de algum tempo o escurecimento da parede provocará uma maior absorção da energia radiante que sobre ela incide, situando-se o seu coeficiente de absorção, neste caso, próximo do valor próprio de uma parede de cor clara.

TABELA 1

ANGULO AZIMUTAL DA PAREDE	ALTURA SOLAR 5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80
0	9.4	16.9	22.5	26.5	28.8	30.2	30.7	30.6	29.9	28.8	27.2	25.3	23.0	20.5	17.7	14.7
5	9.3	16.9	22.4	26.5	28.7	30.1	30.6	30.5	29.8	28.7	27.2	25.2	23.0	20.4	17.6	14.7
10	9.2	16.7	22.2	26.2	28.4	29.8	30.3	30.3	29.6	28.4	26.9	25.0	22.8	20.3	17.5	14.6
15	9.1	16.4	21.8	25.7	27.9	29.3	29.8	29.8	29.1	28.0	26.5	24.7	22.5	20.1	17.4	14.5
20	8.8	16.0	21.3	25.1	27.3	28.6	29.2	29.1	28.5	27.4	26.0	24.2	22.1	19.7	17.1	14.3
25	8.5	15.5	20.6	24.3	26.4	27.8	28.3	28.3	27.7	26.7	25.3	23.6	21.6	19.3	16.8	14.1
30	8.2	14.9	19.8	23.4	25.4	26.7	27.3	27.3	26.7	25.8	24.5	22.9	21.0	18.8	16.4	13.9
35	7.8	14.2	18.9	22.3	24.3	25.5	26.1	26.1	25.6	24.8	23.6	22.1	20.3	18.2	16.0	13.6
40	7.3	13.3	17.8	21.1	22.9	24.2	24.7	24.8	24.3	23.6	22.5	21.1	19.4	17.6	15.4	13.2
45	6.8	12.4	16.6	19.7	21.5	22.6	23.2	23.3	22.9	22.3	21.3	20.0	18.5	16.8	14.9	12.8
50	6.3	11.5	15.3	18.2	19.8	21.0	21.5	21.7	21.4	20.8	20.0	18.9	17.5	16.0	14.3	12.4
55	5.7	10.4	13.9	16.5	18.1	19.2	19.8	19.9	19.8	19.3	18.6	17.6	16.5	15.1	13.6	12.0
60	5.1	9.3	12.4	14.8	16.3	17.3	17.9	18.1	18.0	17.7	17.1	16.3	15.4	14.2	12.9	11.5
65	4.4	8.1	10.9	13.0	14.3	15.3	15.9	16.2	16.2	15.9	15.5	14.9	14.2	13.2	12.2	11.0
70	3.7	6.8	9.2	11.1	12.3	13.2	13.8	14.1	14.2	14.1	13.9	13.5	12.9	12.2	11.4	10.5
75	3.0	5.5	7.6	9.2	10.2	11.1	11.7	12.0	12.2	12.3	12.2	12.0	11.6	11.2	10.6	10.0
80	2.3	4.2	5.9	7.2	8.1	8.9	9.5	9.9	10.2	10.4	10.5	10.5	10.3	10.1	9.8	9.4
85	1.5	2.9	4.1	5.1	5.9	6.6	7.2	7.7	8.1	8.5	8.7	8.9	9.0	9.0	9.0	8.9
Δ	0.8	1.6	2.4	3.1	3.8	4.4	5.0	5.5	6.1	6.5	7.0	7.3	7.7	7.9	8.1	8.3
ΔΔ	0.5	0.9	1.2	1.4	1.6	1.7	1.8	1.9	1.9	2.0	2.0	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1

Δ — Parede em sombra e solo próximo ao Sol.

ΔΔ — Parede em sombra e solo próximo em sombra.

Se a velocidade do vento (v) for diferente da indicada, deve-se proceder também a uma correcção:

$$\Delta T_{sa} = \frac{64 - v}{52} \Delta T'_{sa}$$

sendo a velocidade do vento expressa em Km/h e $\Delta T'_{sa}$ o valor lido na tabela.

Se a altitude do local for superior a 300 m, a correcção a aplicar é:

$$\Delta T_{sa} = \Delta T'_{sa} + 0.00023\ (a - 300)\ \Delta T'_{sa}$$

sendo a altitude do lugar (a) expressa em metros.

De notar que para o caso de paredes em sombra estão assinaladas duas situações: a primeira refere-se ao caso em que o solo próximo está todo ao Sol; no segundo caso o solo está em sombra. Numa situação real se não houver objectos próximos poder-se-á dizer que o acréscimo fictício de temperatura (ΔT_{sa}) duma parede à sombra está situado entre os dois valores indicados na tabela, já que parte do terreno vizinho estará ao Sol e outra parte à sombra. Como é lógico a diferença de valores apresentados na tabela deve-se apenas à incidência na parede da radiação reflectida pelo solo. A vantagem desta forma de proceder em relação à apresentação de um único valor para paredes em sombra, é manifesta, sobretudo nos instantes que se seguem à parede ficar em sombra ou antes de começar a receber radiação directa. Em qualquer destas ocasiões o valor ΔT_{sa} da parede é superior ao que seria apresentado numa tabela geral.

No entanto esta tabela, não torna ainda expedito o cálculo da carga térmica para uma dada parede. Para o seu cálculo, a uma dada hora, torna-se necessário conhecer a temperatura Sol-ar média da parede o que implica a necessidade de fazer um cálculo do

valor da temperatura Sol-ar para todas as horas, desde o nascer ao pôr do Sol.

Para tornar mais rápida a utilização deste método, foram calculados para os meses de Março a Setembro os diferentes valores de ΔT_{sa} e para as principais orientações de paredes. Apenas são indicados estes meses pois no território nacional, o mês de projecto de Verão corresponde sempre a um deles. Geralmente o mês de projecto em Portugal é Julho ou Agosto.

Para a elaboração das tabelas, considerou-se uma latitude de 40° N para o cálculo da altura e azimute solares ao longo do dia, e portanto, para a determinação da intensidade da radiação solar incidente. Embora a declinação varie com o dia do ano, ela foi considerada constante ao longo de cada mês, variando apenas de mês para mês. O seu valor corresponde à declinação característica do mês que se está a considerar, e que é, para os meses tabelados, a existente nos dias 22 de Março, 20 de Abril, 21 de Maio, 21 de Junho, 23 de Julho, 24 de Agosto e 22 de Setembro.

Foi já tomado em conta o efeito atrás referido duma parede em sobra que está a receber a radiação solar reflectida dum solo que estará normalmente uma parte ao Sol e outra à sombra.

A última linha referente a cada parede, indica o valor médio diário de ΔT_{sa} para cada uma das orientações apresentadas.

A coluna referente à parede em sombra diz respeito a uma parede que nunca receba radiação directa, bem como o solo que lhe está próximo. Notar que esta situação é diferente da de uma parede orientada a Norte e que usualmente se costuma designar por «à sombra». Neste caso ela pode receber radiação solar directa: a seguir ao nascer do Sol e até cerca das 6 horas, e antes do pôr do Sol desde as 18 horas aproximadamente. Em relação ao terreno que lhe está próximo, haverá sobre ele incidência solar em maior ou menor percentagem durante todo o dia, excepção feita para as 12 horas, hora a que estará totalmente em sombra.

As correcções a aplicar a estas tabelas são análogas às indicadas para a tabela 1, no que se refere à velocidade do vento, à cor e à altitude.

TABELA 2-A

MÊS DE JUNHO

Parede		N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	Sombra
HORA	0500	4.1	7.8	7.3	2.9	0.6	0.5	0.5	0.6	0.4
	0600	8.6	20.2	21.3	11.3	2.1	1.5	1.4	2.0	1.6
	0700	8.2	24.4	28.7	18.4	3.7	2.4	1.8	3.1	1.9
	0800	5.7	23.5	30.7	23.0	5.2	3.5	1.9	3.6	2.0
	0900	6.1	19.5	28.7	24.9	10.3	4.9	2.4	3.6	2.1
	1000	6.2	13.8	23.7	24.2	14.7	6.3	3.3	3.1	2.1
	1100	4.7	7.7	16.6	20.8	17.5	8.6	5.3	2.3	2.1
	1200	2.1	5.1	8.1	15.4	18.5	15.4	8.1	5.1	2.1
	1300	4.7	2.3	5.3	8.6	17.5	20.8	16.6	7.7	2.1
	1400	6.2	3.1	3.3	6.3	14.7	24.2	23.7	13.8	2.1
	1500	6.1	3.6	2.4	4.9	10.3	24.9	28.7	19.5	2.1
	1600	5.7	3.6	1.9	3.5	5.2	23.0	30.7	23.5	2.0
	1700	8.2	3.1	1.8	2.4	3.7	18.4	28.7	24.4	1.9
	1800	8.6	2.0	1.4	1.5	2.1	11.3	21.3	20.2	1.6
	1900	4.1	0.6	0.5	0.5	0.6	2.9	7.3	7.8	0.4
Média		3.7	5.8	7.6	7.0	5.3	7.0	7.6	5.8	1.1

TABELA 2-B

MÊS DE MAIO OU JULHO

Parede		N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	Sombra
HORA	0500	1.9	3.9	3.8	1.6	0.3	0.2	0.3	0.3	0.2
	0600	7.0	18.0	19.5	10.9	1.9	1.3	1.2	1.8	1.1
	0700	6.6	23.1	28.2	18.9	3.5	2.4	1.7	2.8	1.6
	0800	5.0	22.3	30.6	24.0	6.3	3.6	1.9	3.3	1.8
	0900	5.7	18.3	28.8	26.1	11.7	5.0	2.5	3.3	2.0
	1000	5.8	12.5	23.9	25.4	16.3	6.4	3.5	2.8	2.1
	1100	4.3	7.4	16.6	22.1	19.3	9.7	5.6	2.5	2.1
	1200	2.1	5.0	7.9	16.7	20.3	16.7	8.0	5.0	2.1
	1300	4.3	2.5	5.6	9.7	19.3	22.1	16.6	7.4	2.1
	1400	5.8	2.8	3.5	6.4	16.3	25.4	23.9	12.5	2.1
	1500	5.7	3.3	2.5	5.0	11.7	26.1	28.8	18.3	2.0
	1600	5.0	3.3	1.9	3.6	6.3	24.0	30.6	22.3	1.8
	1700	6.6	2.8	1.7	2.4	3.5	18.9	28.2	23.1	1.6
	1800	7.0	1.8	1.2	1.3	1.9	10.9	19.5	18.0	1.1
	1900	1.9	0.3	0.3	0.2	0.3	1.6	3.8	3.9	0.2
Média		3.1	5.3	7.3	7.3	5.8	7.3	7.3	5.3	1.0

TABELA 2-C

MÊS DE ABRIL OU DE AGOSTO

Parede		N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	Sombra
HORA	0600	3.0	10.8	13.0	8.2	1.1	0.9	0.7	1.0	0.7
	0700	2.9	18.8	25.7	19.2	3.3	2.2	1.4	2.1	1.3
	0800	4.2	18.9	29.7	25.7	9.3	3.5	2.0	2.6	1.7
	0900	4.9	15.0	28.5	28.6	15.3	4.9	2.7	2.7	1.9
	1000	4.8	9.1	23.6	28.3	20.3	6.4	3.9	2.3	2.0
	1100	3.5	6.5	16.3	25.1	23.5	12.3	5.8	2.8	2.1
	1200	2.1	4.8	7.4	19.6	24.6	19.6	7.5	4.8	2.1
	1300	3.5	2.8	5.8	12.3	23.5	25.1	16.3	6.5	2.1
	1400	4.8	2.3	3.9	6.4	20.3	28.3	23.6	9.1	2.0
	1500	4.9	2.7	2.7	4.9	15.3	28.6	28.5	15.0	1.9
	1600	4.2	2.6	2.0	3.5	9.3	25.7	29.7	18.9	1.7
	1700	2.9	2.1	1.4	2.2	3.3	19.2	25.7	18.8	1.3
	1800	3.0	1.0	0.7	0.9	1.1	8.2	13.3	10.8	0.7
Média		2.0	4.1	6.7	7.7	7.1	7.7	6.7	4.1	0.9

TABELA 2-D

MÊS DE MARÇO OU DE SETEMBRO

Parede		N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	Sombra
HORA	0700	1.7	11.5	18.4	15.5	4.7	1.5	1.1	1.3	1.0
	0800	3.1	13.5	26.2	25.5	11.9	3.0	1.9	1.9	1.5
	0900	3.8	10.2	26.4	29.9	18.6	4.4	2.7	2.1	1.8
	1000	3.6	5.6	22.2	30.3	24.1	7.1	4.0	2.0	1.9
	1100	2.9	5.4	15.2	27.6	27.5	15.1	5.4	2.9	2.0
	1200	2.0	4.3	6.5	22.2	28.8	22.2	6.6	4.3	2.0
	1300	2.9	2.9	5.4	15.1	27.5	27.6	15.2	5.4	2.0
	1400	3.6	2.0	4.0	7.1	24.1	30.3	22.2	5.6	1.9
	1500	3.8	2.1	2.7	4.4	18.6	29.9	26.4	10.2	1.8
	1600	3.1	1.9	1.9	3.0	11.9	25.5	26.2	13.5	1.5
	1700	1.7	1.3	1.1	1.5	4.7	15.5	18.4	11.5	1.0
Média		1.3	2.5	5.4	7.6	8.4	7.6	5.4	2.5	0.8

Quanto à correcção em latitude, ela não é necessária. Para qualquer latitude do território continental, os valores de ΔT_{sa} não diferem em mais de 5 % dos valores apresentados para a latitude de 40°, excepção feita para alguns casos situados nas horas próximas do nascer ou do pôr do Sol, ou seja quando a diferença entre a temperaturas Sol-ar e a temperatura exterior é muito pequena. Além disso a diferença entre os valores de ΔT_{sa} para a latitude de 40° e para a mesma hora, não tem sempre o mesmo sinal, para as diferentes orientações das paredes. Nestes casos ter-se-á portanto que para uma sala com quatro paredes exteriores, o erro cometido no cálculo da carga térmica, pelo método da temperatura Sol-ar é inferior a 5 %, já que os erros cometidos pela leitura de ΔT_{sa} de cada uma das paredes tenderão a anular-se. (Isto, como é evidente, supondo que não são cometidos quaiquer outros erros no cálculo da carga térmica).

Notar que o erro de 5 % foi o erro admitido para o cálculo da diferença de temperaturas Sol-ar, o que torna irrelevante a diferença entre os valores apresentados na tabela 1, e os que existiriam para outra latitude qualquer do território continental.

A título informativo, são apresentados nas tabelas 3A e B os valores de ΔT_{sa} para os meses de Março, Junho e Setembro, meses dos equinócios e do solstício de Verão, para as latitudes máxima e mínima do território nacional, isto é, 42° N e 37.2° N.

De referir ainda que todos os programas necessários à elaboração das tabelas foram escritos em FORTRAN IV tendo sido utilizado, para a sua resolução, o computador IBM 360 no sistema de exploração DOS.

BIBLIOGRAFIA

O Clima de Portugal (Fascículo XIII) — Serviço Meteorológico Nacional.

IHVE Guide (Book A) — The Institution of Heating and Ventilating Engineers.

TABELA 3-A

MÊS DE JUNHO

	Parede	Lat. 37.2° N	E	S	W		Lat. 42.0° N	E	S	W
HORA	0500	2.9	5.2	0.4	0.4		4.9	8.7	0.7	0.6
	0600	8.5	20.4	2.0	1.3		8.7	21.9	2.2	1.4
	0700	8.7	28.4	3.6	1.8		7.8	28.9	3.8	1.8
	0800	6.6	30.6	5.2	1.9		5.2	30.7	5.7	1.9
	0900	6.2	28.8	9.1	2.3		5.9	28.6	11.1	2.5
	1000	6.5	23.9	13.3	3.0		5.9	23.6	15.7	3.4
	1100	5.3	16.7	16.0	4.8		4.4	16.5	18.6	5.5
	1200	2.1	8.2	16.9	8.2		2.1	8.0	19.7	8.1
	1300	5.3	4.8	16.0	16.7		4.4	5.5	18.6	16.5
	1400	6.5	3.0	13.3	23.9		5.9	3.4	15.7	23.6
	1500	6.2	2.3	9.1	28.8		5.9	2.5	11.1	28.6
	1600	6.6	1.9	5.2	30.6		5.2	1.9	5.7	30.7
	1700	8.7	1.8	3.6	28.4		7.8	1.8	3.8	28.9
	1800	8.5	1.3	2.0	20.4		8.7	1.4	2.2	21.9
	1900	2.9	0.4	0.4	5.2		4.9	0.6	0.7	8.7
	Média	3.8	7.4	4.8	7.4		3.7	7.7	5.6	7.7

TABELA 3-B

MÊS DE MARÇO OU SETEMBRO

	Parede	Lat. 37.2° N	E	S	W		Lat. 42.0° N	E	S	W
HORA	0700	1.8	19.0	4.7	1.1		1.7	18.0	4.7	1.0
	0800	3.2	26.8	11.7	1.9		3.0	25.8	12.0	1.8
	0900	4.0	26.9	18.2	2.7		3.6	26.0	18.9	2.7
	1000	3.8	22.6	23.4	4.0		3.5	21.9	24.5	4.0
	1100	3.0	15.5	26.7	5.6		2.8	14.9	28.0	5.3
	1200	2.0	6.8	27.9	6.9		2.0	6.4	29.3	6.5
	1300	3.0	5.6	26.7	15.5		2.8	5.3	28.0	14.9
	1400	3.8	4.0	23.4	22.6		3.5	4.0	24.5	21.9
	1500	4.0	2.7	18.2	26.9		3.6	2.7	18.9	26.0
	1600	3.2	1.9	11.7	26.8		3.0	1.8	12.0	25.8
	1700	1.8	1.1	4.7	19.0		1.7	1.0	4.7	18.0
	Média	1.4	5.5	8.2	5.5		1.3	5.3	8.6	5.3